

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## FAKULTA TEXTILNÍ



Obor: 3106T 011 Chemická technologie textilní

**KATEDRA TEXTILNÍ CHEMIE**

# OPTICKÉ SYSTÉMY PRO TEXTILIE

## OPTICAL SYSTEMS FOR TEXTILES

Autor: Bc. Jitka Štibralová

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.

Počet stran:	82
Počet obrázků:	42
Počet tabulek:	10
Počet grafů:	9
Počet příloh:	0

Zadání bakalářské práce

(vložit originál)

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL. Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že s o u h l a s í m s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek a úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že si svou diplomovou práci mohu vyzvednout v Univerzitní knihovně TUL po uplynutí pěti let po obhajobě.

V Liberci dne 12. 5. 2010

.....

podpis

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Jakub Wiener, Ph.D. za cenné rady, odborné vedení a mnoha podnětů při zpracování této diplomové práce. V neposlední řadě děkuji přátelům a rodině za podporu během studia.

## **ANOTACE**

Předkládaná diplomová práce se zabývá optickými systémy pro textilie. Zaměřuje se především na neviditelnostní textilií a modifikaci optických vláken barvením. Hodnotí vybarvení optických vláken spektrofotometricky a pomocí programu obrazové analýzy (ImageJ). Dále se věnuje návrhu neviditelnostní textilie na základě znalostí chování optických vláken a jiných optických prvků v prostředí optického softwaru. Některé z vybraných přístupů jsou testovány i experimentálně, například možnost přípravy optických čoček z polymerů pro textilní systémy.

### **KLÍČOVÁ SLOVA:**

optická vlákna, neviditelnost, optické čočky, optický program, světlo, barvení

## **ANNOTATION**

The dissertation which is presented is dealing with optical systems for textiles. It is interested in invisibility and modification of optical fibres by colouring. It evaluates coloration of optical fibres spectrophotometrical and by the help of analysis image. As next it is interested in invisibility on the basis of knowledge of behaviour optical fibres and others optical elements in optical software's surrounding. Some of the chosen theory can be tested experimentally as well. E. G.: Possibility of preparation optical lens from polymers for textile systems.

### **KEY WORDS:**

optical fibres, invisibility, optical lenses, optical software, light, coloring

## Obsah

Seznam použitých značek a zkratk	8
Úvod	9
1 TEORETICKÁ ČÁST	10
1.1 Optická vlákna	10
1.1.1 Struktura optického vlákna	10
1.1.2 Princip přenosu optického záření optickým vláknem	11
1.1.3 Rozdělení optických vláken	11
1.1.3.1 Jednovidová optická vlákna	12
1.1.3.2 Mnohovidová optická vlákna	12
1.1.3.3 Vlákná pro speciální účely	14
1.1.4 Hlavní parametry optických vláken	14
1.1.4.1 Šířka pásma optického vlákna	14
1.1.4.2 Numerická apertura - NA	14
1.1.4.3 Disperze	15
1.1.4.4 Útlum světelného signálu v optické vlákne	16
1.1.4.5 Minimální poloměr ohybu	17
1.1.4.6 Obsah OH-	17
1.1.4.7 Parametr MFD	18
1.1.5 Výroba optických vláken	18
1.1.6 Použití optických vláken	19
1.2 Optika	21
1.2.1 Světlo	22
1.2.1.1 Rychlost světla	23
1.2.1.2 Rozptyl a absorpce světla	23
1.2.1.3 Šíření světla	23
1.2.1.4 Odraz a lom světla	25
1.2.1.5 Disperze světla	27
1.2.1.6 Interference světla (skládání)	28
1.2.1.7 Difrakce světla (ohyb)	29
1.2.1.8 Polarizace světla	29
1.2.2 Zobrazování optickými soustavami	30
1.2.2.1 Základní pojmy	30
1.2.2.2 Zobrazení čočkou	31
1.2.3 Lidské oko	35

1.3 Neviditelnost .....	37
1.3.1 Optické kamufláže ( maskování ).....	37
1.3.2 Princip neviditelnosti .....	38
1.3.3 Digitální neviditelnost .....	39
1.3.4 Optická neviditelnost .....	40
1.3.4.1 Technické problémy při zneviditelnění soustavy – hmotnost soustavy	40
1.3.4.2 Technické problémy při zneviditelnění soustavy – počet pixlů.....	41
1.3.4.3 Organizace světlovodů.....	42
1.3.4.4 Sestavení čoček a světlovodů do textilního útvaru .....	43
1.3.5 Metamateriály.....	44
2 Experimentální část .....	45
2.1 Příprava optických čoček pro textilní systémy.....	45
2.1.1 Příprava optických čoček z dentakrylu.....	45
2.1.1.1 Postup při výrobě optických čoček.....	45
2.1.2 Příprava optických čoček tavením polymerního granulátu .....	46
2.1.2.1 Postup při výrobě optických čoček.....	47
2.1.3 Příprava optických čoček pomocí tavné pistole .....	48
2.1.3.1 Vytvářením kapek na hliníkovou folii.....	48
2.1.3.2 Vytvářením kapek do vody.....	49
2.1.4 Postříbření optických čoček.....	50
2.2 Analýza optického vlákna.....	52
2.2.1 Infračervená analýza optického vlákna .....	52
2.2.1.1 Polyvinylidenfluorid (PVDF).....	53
2.3 Modifikace optických vláken barvením.....	54
2.3.1 Barvení optických vláken disperzními barvivy.....	54
2.3.1.1 Hodnocení vybarvení pomocí spektrofotometru.....	56
2.3.1.2 Hodnocení vybarvení pomocí programu ImageJ.....	60
2.3.2 Barvení optických vláken metodou sol-gel vrstev .....	65
2.3.3 Distribuce barviva v optickém vlákně.....	70
2.4 Návrh konstrukce neviditelnostní textilie - OSLO .....	71
2.4.1 Základy práce v optickém programu OSLO.....	71
2.4.2 Návrh neviditelnostní textilie.....	76
2.5 Diskuze reálnosti neviditelnostní textilie a její použití.....	78
Závěr.....	79
Seznam použité literatury:.....	81

## Seznam použitých značek a zkratek

A	- absorbance
atd.	- a tak dále
C	- koncentrace
c	- rychlost světla
cm	- centimetr
db	- decibel
g	- gram
Hz	- herz
IR	- infračervené záření
kg	- kilogram
km	- kilometr
l	- litr
m	- metr
mm	- milimetr
min	- minuta
n	- index lomu
NA	- numerická apertura
např.	- například
nm	- nanometr
resp.	- respektive
s	- sekunda
tj.	- to je
tvz.	- tak zvané
tzn.	- to znamená
VIS	- viditelné záření
UV	- ultrafialové záření
$\mu\text{m}$	- mikrometr
$\lambda$	- vlnová délka



## Úvod

Neviditelnost byla prozatím doménou science-fiction, v průběhu několika posledních let se stala předmětem seriózního vědeckého bádání. Nejstarší formou pokusu o neviditelnost je maskování. Průhledné předměty lze skrýt ponořením do kapaliny o stejném indexu lomu. Zneviditelnit reálný předmět je však daleko složitější problém, který je třeba řešit jinými způsoby.

Dopadá-li světlo na rozhraní dvou různých optických prostředí (např. vzduch – předmět), pak se částečně láme a částečně odráží podle zákonů lomu a odrazu. Z každého bodu předmětu vycházejí všemi směry světelné paprsky, které zachytí oko. Předmět se tedy stává viditelným. Pokud by materiál světlo neodrazil, ale propustil, stal by se neviditelným. Světlo nemůže procházet skrytým předmětem, ale musí ho obejít, aniž by podle pozorovatele změnilo barvu a intenzitu.

Diplomová práce se zabývá především návrhem konstrukce neviditelnostní textilie. Vychází ze systému složeného ze dvou čoček a optického vlákna. Tento návrh je simulován v prostředí optického programu OSLO. Experimentálně je pak vyzkoušena výroba optických čoček z polymerních materiálů.

Oblast pro použití neviditelnostní textilie je široká. Největší zájem o ní jeví armáda. Využití by našla i v lékařství např. při operaci by se zneviditelnila ruka chirurga, takže by byl vidět přímo skalpel, operace by se stala přehlednější. Další možnost uplatnění skýtá parkování aut (zakrytí zadní části vozu), ukrytí zvukových bariér a jiných prvků ovlivňujících panorama krajiny. Neviditelnost má však i své nevýhody. Za hlavní lze považovat nemožnost spoléhat se na vlastní smysly už v tak dost hektickém světě nebo její zneužití při nezákonných činnostech.

Teoretická část popisuje vlastnosti a chování optických vláken. Dále se zabývá základy optiky a podstatou neviditelnosti.

Experimentální část zkoumá možnosti výroby optických čoček z polymerních materiálů. Dále se zabývá návrhem konstrukce neviditelnostní textilie, analyzuje dostupná optická vlákna a modifikuje je barvením, ke kvantifikaci obsahu barviva na vlákne využívá kromě spektrofotometrické metody i program obrazové analýzy. V samotném závěru se nachází diskuze k použitelnosti neviditelnostní textilie.

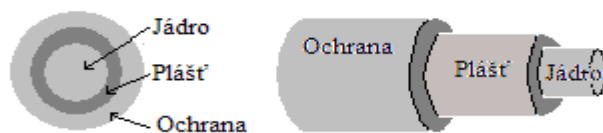
# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Optická vlákna

Optické vlákno je skleněné nebo plastové vlákno, které umožňuje přenos optického záření o vlnových délkách od 200 nm do 20  $\mu\text{m}$  (tzn. záření ultrafialové (UV), viditelné (VIS) a infračervené (IR)). Rozsah, vlnových délek optického vlákna, je dán konstrukcí vlákna a použitými materiály jádra a pláště.[1]

### 1.1.1 Struktura optického vlákna

Základ optického vlákna tvoří jádro a plášť. Jádro slouží k přenosu světelného signálu a plášť svými optickými vlastnostmi zabezpečuje správnou funkci vlákna i při měnících se podmínkách prostředí. Poslední vrstvu tvoří ochrana, která chrání vlákno před zničením a u skleněného vlákna umožňuje i ohýbání, obvykle je vyrobena z plastu. Na obrázku 1 jsou znázorněny základní vrstvy optického vlákna. Optické záření prochází jádrem. Světelné paprsky se tedy odrážejí od pláště a jsou tak udržovány ve vnitřní vrstvě. [1]



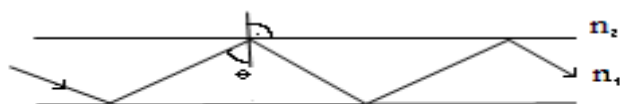
*Obr.1 Struktura optického vlákna*

### 1.1.2 Princip přenosu optického záření optickým vláknem

Optické vlákno je vlnovod, kterým se šíří elektromagnetické vlny (většinou světlo nebo infračervené záření) ve směru osy vlákna s využitím principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí s rozdílnými indexy lomu. Pro zajištění vlnovodného efektu musí být index lomu jádra ( $n_1$ ) větší než index lomu pláště ( $n_2$ ). [2]

Dopadne-li paprsek na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi, s různými indexy, dochází v závislosti na úhlu, pod kterým dopadají k odrazu zpět do původního prostředí nebo k prostupu do druhého prostředí. Jeli tento úhel větší než mezní úhel ( mezní úhel je největší úhel dopadu, při kterém ještě nastává lom vlnění), dochází k totálnímu (úplnému) odrazu zpět do původního prostředí.

Při vhodně zvoleném úhlu dopadu paprsku dochází pouze k odrazům a ne k lomu optického záření (Obr.2). Světelný paprsek bude veden optickým prostředím – vznikne světlovod.[1]



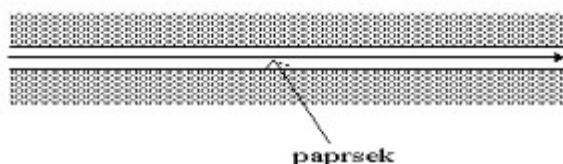
Obr. 2 Princip přenosu paprsku optickým vláknem

### 1.1.3 Rozdělení optických vláken

Optická vlákna rozdělujeme do třech základních skupin a to na vlákna mnohovidová, jednovidová a vlákna pro speciální účely. Podrobnější třídění optických vláken je založeno na geometrických rozměrech a na jejich přenosových parametrech.

### 1.1.3.1 Jednovidová optická vlákna

Jednovidová vlákna přenášejí jeden paprsek. Paprsek je veden optickým vláknem bez odrazu, to umožňuje malým průměrem jádra (Obr.3), dopomáhá k tomu také malý poměrný rozdíl indexů lomu jádra a pláště. Průměr jádra jednovidového vlákna je v rozsahu 300nm-1600nm (tj. asi 4 až 10  $\mu\text{m}$ ). Velikost používaného průměru je závislá na přenášené vlnové délce. Jednovidová vlákna se používají pro přenos informací na velké vzdálenosti.



*Obr.3 Jednovidové optické vlákno*

### 1.1.3.2 Mnohovidová optická vlákna

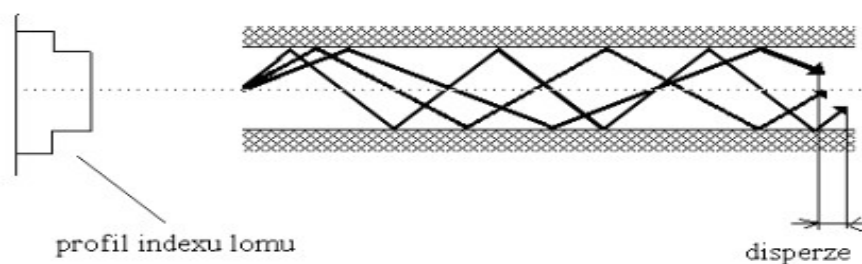
Mnohovidová vlákna na rozdíl od jednovidových vláken přenášejí více paprsků. To vyplývá i z rozměrů jader vláken. Jádro mnohovidového vlákna má oproti jednovidovému vlákně větší průměr jádra. Průměr vlákna se pohybuje od 50  $\mu\text{m}$  do 2000  $\mu\text{m}$ . Jsou méně citlivá na vlnovou délku přenášeného paprsku. Mohou být skleněná nebo plastová. [1]

Rozeznáváme dvě skupiny mnohovidových vláken, vlákna se skokovou změnou indexu lomu a tzv. gradientní vlákna. Základními parametry těchto vláken jsou přenosová šířka pásma, útlum, numerická apertura. [2]

### Vlákna se skokovou změnou indexu lomu

Paprsky vstupují do vlákna pod mnoha úhly. Ve vlákně se šíří totálním odrazem. Paprsky se pohybují po různých drahách, proto na konec vlákna nedorazí ve stejný čas, ale postupně. Vytváří se tak vícevidový způsob šíření. Vlivem rozdílného šíření signálu

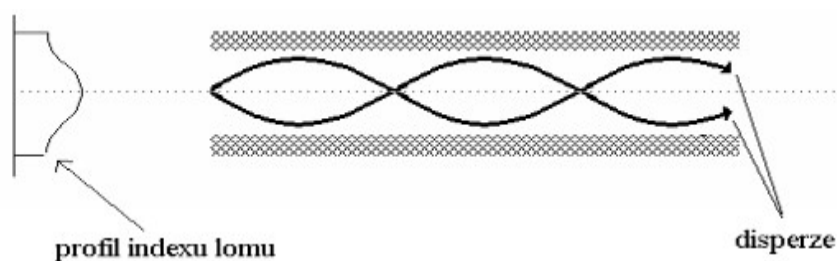
ve vlákne dochází k jevu nazývanému disperze. Vlákná se skokovou změnou indexu lomu se používají na krátké vzdálenosti (Obr.4).



*Obr. 4 Vláknó se skokovou změnou indexu lomu*

### **Gradientní vlákna**

U gradientních vláken paprsek opisuje sinusovou křivku (Obr.5) a tím snižuje vidovou disperzi. Index lomu se snižuje se vzdáleností od středu vlákna. Paprsky šířící se blíže k plášti (index lomu zde má menší hodnotu) mají vyšší rychlost a celková doba jejich šíření vláknem na velké vzdálenosti se málo liší od doby šíření přímého paprsku, který prochází středem jádra a tedy s prostředím s nejvyšší hodnotou indexu lomu. Jednotlivé paprsky dojdou na konec vlákna skoro ve stejném čase. Používají se v datových aplikacích.[2]



*Obr. 5 Vláknó s gradientní změnou indexu lomu*

### **1.1.3.3 Vlákná pro speciální účely**

Vlákná pro speciální účely mohou být např. optická vlákna dotovaná prvky vzácných zemin, optická vlákna pro vývoj vláknových zesilovačů nebo kompenzační vlákna ke kompenzaci chromické disperze. Některá vlákna jsou konstruována s neválečkovým jádrem jiná s obkládací vrstvou, obvykle s elipsovitým nebo obdélníkovým příčným řezem. Vlastnosti vláken mohou být přizpůsobeny širokou škálou možností.[2]

### **1.1.4 Hlavní parametry optických vláken**

- Šířka pásma
- Numerická apertura
- Disperze
- Útlum
- Minimální poloměr ohybu
- Obsah OH-
- Parametr MFD u jednovidových vláken
- Mezní vlnová délka u jednovidových vláken

#### **1.1.4.1 Šířka pásma optického vlákna**

Udává nejvyšší kmitočet signálů, které mohou být spolehlivě přeneseny na vzdálenost 1 km mnohovidovým vláknem bez zkreslení signálu působením disperze.

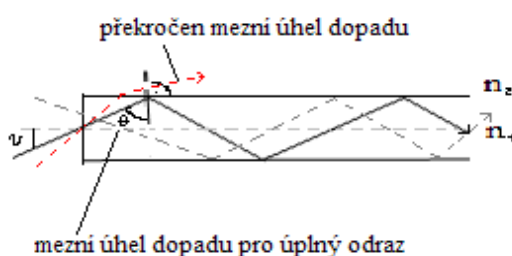
#### **1.1.4.2 Numerická apertura - NA**

Jedná se o důležitou charakteristiku optického vlákna. Je to maximální úhel pod jakým mohou světelné paprsky dopadat do optického vlákna tak, aby se jím mohli šířit. Číselně vyjádřená numerická apertura odpovídá sinu maximálního úhlu  $\alpha_{\max}$ , pod

kterým se vstupující paprsky ještě v optickém vlákne šíří. Pokud paprsky dopadnou pod větším úhlem, nebudou se šířit vůbec.

Pro vedení optického záření světlovodem je nutný úplný odraz paprsku na rozhraní jádro-plášť. Je-li velikost mezního úhlu k ose vlákna překročena, dojde na rozhraní k jeho lomu. Paprsek se neodrazí, přejde do pláště a dojde k jeho vyvázání ven z vlákna.

$$\sin \Theta = n_2/n_1 \quad (1)$$



Obr. 6 Definice NA

#### 1.1.4.3 Disperze

Příčinou zkreslení přijímaného signálu je disperze. Rozeznáváme tři druhy disperze:

- vidová disperze
- chromatická disperze
- polarizační disperze

##### Vidová disperze

Tento typ disperze se uplatňuje u mnohovidových vláken. Paprsky dorazí vlivem rozdílné délky drah v různých časových okamžicích. Signál získaný z jednotlivých paprsků se liší od vstupního amplitudou i tvarem. Vidová disperze se uplatňuje při přenosu dat na větší vzdálenosti (větší než 1km), jejím vlivem dochází ke zkreslení impulsu.[2]

Vidová disperze omezuje rychlost, vzdálenost a šířku pásma přenosu. Lze ji ovlivnit uspořádáním vlákna, při používání gradientních vláken je zmenšována. U jednovidových vláken se vidová disperze nevyskytuje.

### **Chromatická disperze**

Zdroje záření nejsou ideálně monochromatické, optické záření se skládá z určitého spektra vlnových délek. Každá složka tohoto spektra se ve vlákne šíří jinou rychlostí, zároveň se s vlnovou délkou mění index lomu. Jednotlivé složky spektra na konec vlákna dorazí v různém časovém okamžiku. Mají jiný časový průběh než na začátku vlákna.

### **Polarizační disperze**

Objevuje se u vláken jednovidových. U jednovidových vláken se šíří paprsek ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách. Kterákoliv kruhová asymetrie vlákna způsobí šíření obou polarizací jinou rychlostí a tedy rozšíření impulzu nebo zkreslení analogového signálu.[2]

#### **1.1.4.4 Útlum světelného signálu v optické vlákne**

Je měřítkem ztrát optické energie ve vlákne. Je definován jako poměr vstupního světelného výkonu  $P_1$  a výstupního světelného výkonu  $P_2$  pro danou vlnovou délku  $\lambda$  podle vztahu:

$$\text{útlum} = b = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (2)$$

Útlum se udává v dB/km. Se vzdáleností od zdroje výkon (signál) klesá. Obecně lze říci, že útlum se projevuje až v stokilometrových vzdálenostech.



### **Měrný útlum vlákna $\alpha$**

je to útlum na 1km délky

$$\alpha = \frac{b}{l} = \frac{1}{l} 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (3)$$

Hlavními příčinami útlumu světelného signálu v optickém vlákne je absorpce a rozptyl světelných paprsků. Ztráty vznikají :

- přímo v materiálu vlákna
- na rozhraní prostředí vlákna
- při spojování vláken
- ohyby optického vlákna[1]

#### **1.1.4.5 Minimální poloměr ohybu**

Je to nejmenší ohyb, který je možno při připojení vlákna použít. Minimální poloměr ohybu je závislý na materiálu, ze kterého je vlákno vyrobeno, a na jeho průměru. Čím je průměr vlákna větší, tím je větší minimální poloměr ohybu. Plastová vlákna mají při stejném průměru menší minimální poloměr ohybu než vlákna skleněná.

#### **1.1.4.6 Obsah OH-**

Zbytková vlhkost ve formě iontů OH-, ovlivňuje na určitých vlnových délkách útlum vlákna. Rozeznávají se vlákna s nízkým obsahem OH- skupin, ty jsou určena pro použití v oblasti blízké infračervenému záření, nebo s vysokým obsahem OH-skupin se používají v ultrafialové a viditelné oblasti světelného záření.

#### **1.1.4.7 Parametr MFD**

U jednovídrových vláken se často místo průměru vlákna používá parametr MFD. MFD je konstanta, která udává šířku, ve které je intenzita přenášeného optického záření větší nebo rovna 0,135 z maximální intenzity. Čím je MFD menší tím je vlnová délka kratší. Tento parametr se používá při výpočtu útlumu vlákna při spojování vláken, které mají různé MFD, ale stejné geometrické rozměry. [1]

### **1.1.5 Výroba optických vláken**

#### **Materiál pro výrobu optických vláken:**

Nejčastěji se pro výrobu optických vláken používají skla (sodnovápenatá, boritokřemičitá, skla s vysokým obsahem  $\text{GeO}_2$  a křemenná). Z plastických materiálů jsou užívána nejčastěji polymethylmetakryláty a polymetylsiloxany. Pro výrobu optických vláken s malým útlumem se používá např.  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{AgCl}$  nebo  $\text{AgBr}$ . [1]

Jako výchozí surovinu pro miniaturních optická vlákna lze použít i vlákna, která spřádají pavouci *Nephila madagascariensis* žijící na Madagaskaru nebo *Stegodyphus pacificus* jižní Asie a Střední východ. [26]

#### **Při výrobě optických vláken jsou užívány dva základní způsoby :**

- metoda dvojího kelímku
- metoda tyčka v trubce

#### **Metoda dvojího kelímku**

Vláknko je vyráběno ze dvou koncentrických kelímků. V jednom je roztavený materiál pláště a v druhém materiál jádra. Tímto způsobem je možné, dodáváním taveniny do kelímku vyrábět vlákna libovolné délky. [22]

### **Metoda tyčka v trubce**

Vlákno je vyráběno natavením tyčky materiálu jádra zasunutého v trubce z materiálu pláště.

### **Výroba vláken z preformy**

Preforma je válec z materiálu vlákna. Preformy se vyrábí různými způsoby např. takto: do vysokofrekvenčně ohřívané trubky z křemičitého skla jsou postupně zaváděny plynné chemikálie, jejichž plazmatickým rozkladem vzniká nejprve vrstva pláště a následně jádra. Výroba optického vlákna je prováděna natahováním preformy, měřením průměru odtékajícího vlákna a pokrývání vlákna ochranným pláštěm. [22]

#### **1.1.6 Použití optických vláken**

Optická vlákna jsou široce používána především v komunikacích, kde umožňují přenos na delší vzdálenosti a při vyšších přenosových rychlostech dat, než jiné formy. Nahrazují kovové vodiče, signály přenášejí s menší ztrátou a zároveň jsou imunní vůči elektromagnetickému rušení. Dále se optická vlákna používají k osvětlení. Aplikaci optických vláken nalezneme i v průmyslových podnicích, ve zdravotnictví, v letectví a kosmonautice, v počítačových sítích, v automobilech a ve vojenských systémech.

#### **Výhody při přenosu informací optickými vlákny**

- dosažení vysokých přenosových rychlostí
- spolehlivost přenosových systémů
- odolnost přenášených informací vůči rušení
- malé rozměry a hmotnosti vláken i kabelů
- přenos na velmi dlouhé vzdálenosti díky malému útlumu vláken

### **Použití optických vláken v textilu:**

Optická vlákna se v textilním průmyslu používají v souvislosti s inteligentními textiliemi. Především jako textilní čidla, která jsou schopna indikovat změnu stavu a podmínek v okolí. Používají se v kompozitech, technických textiliích a speciálních zařízeních pro sledování a indikaci veličin. Aplikace optických vláken v textilu jsou široké např. elektronické a svítící textilie.[29]

### **Elektronické textilie**

Tyto textilie nacházejí široké použití v lékařství a ve vojenství. Jako příklad může sloužit inteligentní košile vyvinuta výzkumný ústavem Georgia Tech. Tento oděv používá optická vlákna k detekci zranění a speciální čidla k monitorování zdravotního stavu během boje. Lékařská čidla jsou připevněna k tělu a připojena do inteligentní počítačové textilie. Textilie je tvořena z optických vláken a speciálních nití, které dohromady utváří spojitý celek. Systém dokáže zjistit fyzikální polohu problému na těle během několika vteřin. To umožňuje poskytnout bezprostřední pomoc. Dále je možné nastavit čidla v souladu s požadavky uživatele. [12]

### **Svítící textilie**

Další aplikací optických vláken v textilu mohou být svítící textilie (Obr.7). Ze svítících textilií se vyrábějí oděvy i různé textilní doplňky. V tkaniny jsou zatkány stovky velmi jemných optických vláken. Údržba textilií se od klasických materiálů nijak neliší, perou se na 40 °C a žehlí jako hedvábí.



*Obr. 7 Svítící textilie [18]*

Rozdíl oproti běžným textilním materiálům je nutnost textilií dobít. Doba dobíjení je kolem sedmy hodin, provádí se pomocí klasického síťového kabelu. Využití oděvů z těchto materiálů je široké ať se jedná o módu nebo bezpečnost.[30]

## 1.2 Optika

Optika je spolu s mechanikou nejstarším oborem fyziky. Zabývá se optickým zářením (především světlem), jeho vznikem, zákonitostmi jeho šíření a fyzikálními ději při interakci s látkami. [6]

V několika posledních desetiletích došlo v oblasti optiky k významným objevům, které přispěly k řadě aplikací ovlivňujících náš každodenní život např. CD, DVD, přehrávače, tiskárny, optické komunikace atd.. O tom, že se jedná o nejstarší obor fyziky svědčí fakt, že již ve starověkém Řecku bylo známo šíření světla ve formě paprsků, jejich odraz a lom. Celou historii optiky však doprovází otázka, zda je světlo proud částic nebo vlnění.[5]

Podle přístupu k světelným jevům a metod bádání můžeme optiku rozdělit na:

### 1. Optiku vlnovou

Vychází z vlnové podstaty světla. Zabývá se vlnovými jevy, jsou to např. disperze, interference, difrakce (ohyb) a polarizace světla.

### 2. Optiku paprskovou (geometrickou)

Vychází ze třech zákonů optiky. První zákon pojednává o přímočarém šíření světla (v opticky stejnorodém prostředí). Další popisuje lom světla a poslední je zákon odrazu. Hlavním problémem paprskové optiky je její zobrazování optickými soustavami.

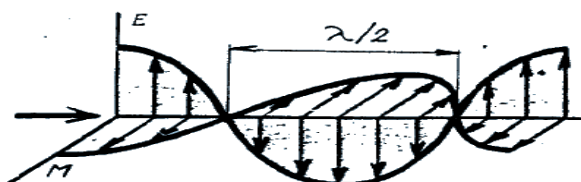
### 3. Optiku kvantovou

Zabývá se ději, při nichž se projevují kvantové vlastnosti optického záření. Jsou to hlavně děje, kdy dochází ke vzájemnému působení světla a látky. Při těchto fyzikálních dějích se energie optického záření vyzařuje nebo pohlcuje v kvantech. Optické záření má charakter vlnový i částicový, je tvořeno fotony majícími energii a hybnost.[4]

#### 1.2.1 Světlo

Základní podmínkou lidského vidění je světlo. Světlo je elektromagnetické záření o frekvencích  $3,95 \cdot 10^{14}$  Hz až  $7,89 \cdot 10^{14}$  Hz a vlnové délce 380nm až 760nm. Světlo určité vlnové délky popisuje barva (720-625nm červené barvy, 627- 589nm oranžové barvy, 589-566nm žluté barvy, 566-495nm zelené barvy, 495-436nm modré barvy a 436-380nm fialové barvy).

Monochromatické světlo (světlo definované délky) si lze představit jako šíření elektrického a magnetického vektoru, které jsou na sebe kolmé, mění se periodicky s časem, jsou vzájemně ve fázi a šíří se rychlostí světla ve vakuu  $c$  (Obr.8).[7]



Obr.8 Ztvárnění elektrického a magnetického vektoru světla [7]

Monochromatické světlo je možno popsat vlnovou délkou  $\lambda$ , frekvencí  $f$ , vlnočtem  $\tilde{\nu}$  a energií  $E$ . Vzájemné vztahy mezi výše uvedenými veličinami uvádějí následující rovnice:

$$f \cdot \lambda = c \quad (4)$$

$$\tilde{\nu} = f/c = 1/\lambda \quad (5)$$

$$E = h \cdot f \quad (6)$$

$$f = \tilde{\nu} \cdot c \quad (7)$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu a  $h$  Planckova konstanta  $h=6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ J Hz}^{-1}$ . [7]

V praxi většinou nevnímané monochromatické (jednoduché) světlo, ale světlo složené z několika vlnových délek. Barevný vjem (kterému odpovídá charakteristický odstín) je pak určen účinky jednotlivých složek světla na zrak. [6]

#### **1.2.1.1 Rychlost světla**

Důležitou charakteristikou světla je rychlost šíření ve vakuu značí se  $c$  a odpovídá hodnotě  $2,9979245 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Pro většinu výpočtů se používá přibližná hodnota  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

Rychlost světla se snižuje s rostoucí hustotou optického prostředí a je různá pro jednotlivá monochromatická světla. Ve vzduchu má rychlost světla téměř stejnou hodnotu jako ve vakuu, ve vodě pak klesá na  $2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Ve skle se světlo šíří rychlostí v intervalu  $1,5 \cdot 10^8 \text{ m/s} - 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  v závislosti na druhu skla.[6]

#### **1.2.1.2 Rozptyl a absorpce světla**

Pokud prostředí nepravidelně mění směr světla nastává rozptyl světla. Rozptyl světla je dán indexem lomu a tvarem předmětu. Jestliže prostředí pohlcuje světlo nebo některé jeho vlnové délky jedná se adsorpci světla.

#### **1.2.1.3 Šíření světla**

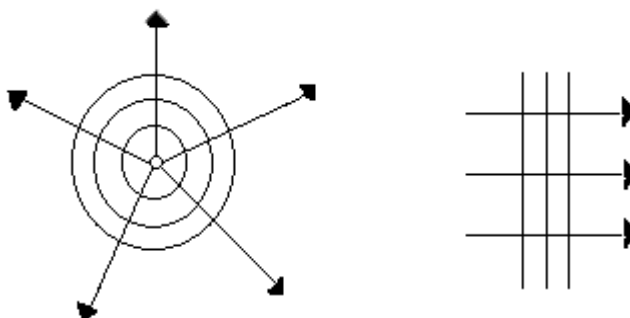
Tělesa vyzařující světlo se nazývají světelné zdroje. Optickým prostředím se nazývá prostředí, kterým se světlo šíří (vakuum neboli jakákoliv látka).

Optické prostředí ovlivňuje šíření, pohlcování, rozptyl a další optické vlastnosti světla. Může být:

- průhledné - záření zde není pohlcováno ani rozptylováno
- průsvitné - světlo se v něm z části rozptyluje
- neprůhledné - dochází k pohlcování nebo odrazu světla

Homogenním optickým prostředím nazýváme takové prostředí, které má ve všech částech svého objemu stejné optické vlastnosti. Izotropní optické prostředí je pak takové, kde nezávisí rychlost šíření světla na směru (např. sklo). Závisí-li rychlost světla na směru jedná se o prostředí anizotropní (krystal křemene).[4]

V homogenním izotropním prostředí se světlo ze zdroje šíří všemi směry stejně. Tento děj lze popsat Huygensovým principem (viz kap. 1.2.1.4.) Světelné vlnění vzniklé ve zdroji světla se šíří ve vlnoplochách směrem od zdroje. Vlnoplocha je plocha jejíž body kmitají se stejnou fází. Pokud se jedná o bodový zdroj světla (rozměry zdroje jsou zanedbatelné) tak vlnoplochy mají tvar soustředěných kulových ploch, ve větší vzdálenosti od zdroje světla je lze považovat za rovinné vlnoplochy(Obr.9).



*Obr. 9 Znázorňuje vlnoplochy světelného záření*

Přímky, které jsou kolmé na vlnoplochu, se nazývají světelné paprsky. Udávají směr šíření světla v homogenním optickém prostředí. U reálných zdrojů světla vychází světlo současně z mnoha bodů. Paprsky vycházejí z každého bodu všemi směry,



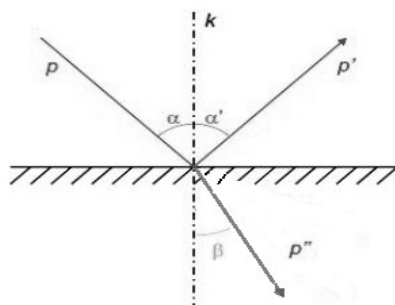
navzájem se protínají přitom se však neovlivňují a postupují prostředím nezávisle jeden na druhém. Tento poznatek se nazývá princip nezávislosti chodu světelných paprsků. Paprsky se tedy v opticky homogenním prostředí šíří přímočaře.

Pokud se mluví o přímočarém šíření paprsků, přehlíží se vlastnost světla vlnění (tj ohyb vlnění na překážkách). Zákon přímočarého šíření světla platí pouze za předpokladu, že vlnová délka světla je zanedbatelná vzhledem k velikosti překážky. Jeho důsledkem je stín vznikající za neprůhlednou překážkou.[6]

#### 1.2.1.4 Odraz a lom světla

Odraz a lom světla se řídí zákony, které byly odvozeny pro mechanické vlnění z Huygensova principu. Tento princip popisuje jednu z představ o šíření vlnění a říká, že každý bod vlnoplochy, do něhož postupné vlnění v izotropním prostředí vstoupilo v určitém okamžiku, lze pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních plochách. V dalším časovém okamžiku je vlnoplocha vnější obalová plocha jednotlivých vlnoploch, v němž se vlnění šíří (Obr.8). Je-li známá poloha a tvar vlnoplochy, v některém předchozím okamžiku Huygensoův princip ji umožňuje zkonstruovat v určitém okamžiku.

Dopadne-li paprsek na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi (různými indexy lomu), pak se světlo částečně odráží a částečně láme do druhého prostředí. Nastává lom a odraz světla (Obr.10).[4]



Obr. 10 Odraz a lom světla

## Odraz světla

Vrací-li se světelný paprsek při dopadu na rozhraní dvou prostředí s odlišnými optickými vlastnostmi, do prostředí z něhož přichází odráží se. Paprsek na rozhraní dopadá pod úhlem dopadu  $\alpha$ , tento úhel svírá z kolmicí dopadu  $k$ , která je vztyčená v místě dopadu na rozhraní optických prostředí. Pokud rozhraní není tvořeno rovinou plochou, kolmice se vztyčí na tečnu k zakřivené ploše v místě dopadu světelného paprsku. Rovinou dopadu se nazývá rovina, v níž leží paprsek dopadajícího světla a kolmice dopadu. Vztah mezi úhlem dopadu a úhlem odrazu je dán zákonem odrazu světla. Velikost úhlu odrazu  $\alpha'$  se rovná velikosti úhlu dopadu  $\alpha$ :

$$\alpha' = \alpha \quad (8)$$

## Lom světla

K lomu světla dochází na rozhraní dvou prostředí jako důsledek různých rychlostí šíření světla v různých optických prostředí. Pro směr lomeného paprsku platí vztah:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \quad (9)$$

Podíl rychlostí světla  $v_1$ ,  $v_2$  v obou prostředí je pro dána prostředí konstantní a definuje důležitou veličinu. Tato veličina se nazývá index lomu ( $n$ ) a je popsána, jako poměr rychlosti světla ve vakuu ( $c$ ) a rychlosti světla ( $v$ ) v daném prostředí.

$$n = \frac{c}{v} \quad (10)$$

Takto definovaný index lomu se nazývá absolutní index lomu optického prostředí. Index lomu pro vakuum je tedy roven jedné. Vzduch má index lomu přibližně stejný jako vakuum. U všech ostatních optických prostředí je  $n > 1$ .

### **Zákon lomu světla**

V 17. století W. Snell objevil zákon lomu světla někdy nazývaný také Snellův zákon. Je definován vztahem:

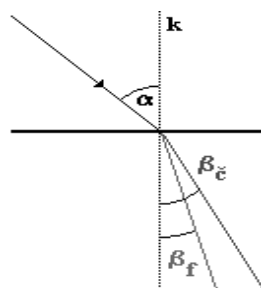
$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \quad (11)$$

Dvě optická prostředí můžeme porovnávat podle indexu lomu, prostředí o menším indexu lomu nazýváme prostředí opticky řidší a o větším indexu lomu je prostředí opticky hustší. Pokud dochází k lomu při přechodu světla z prostředí o nižším indexu lomu do prostředí o vyšším indexu lomu nastává lom světla ke kolmici ( $\beta < \alpha$ ) a naopak nastává lom světla od kolmice ( $\beta > \alpha$ ).

Když je úhel lomu  $\beta = 90^\circ$  tak úhel dopadu se nazývá mezní úhel  $\alpha_m$ . Mezní úhel je největší úhel dopadu při kterém ještě nastává lom světla. Pokud je úhel dopadu větší než mezní úhel nastává úplný odraz světla.[6]

#### **1.2.1.5 Disperze světla**

Rychlost světla ve vakuu je nezávislá na frekvenci světla. Jakmile světlo prochází prostředím, které má index lomu větší jako jedna, jeho rychlost se mění v závislosti na frekvenci světla (vlnové délce světla). Tento jev se nazývá disperze světla. V látkách obvykle rychlost světla klesá s rostoucí frekvencí světla. Vlivem disperze se paprsky světla různých barev lámou pod různými úhly. Nejméně se láme paprsek světla červeného  $\beta_e$  a nejvíce paprsek světla fialového  $\beta_f$  (Obr.11).



*Obr. 11 Disperze světla*

Prochází-li světlo rozhraním optických prostředí pak se jeho frekvence ( $f$ ) nemění, ale mění se jeho rychlost ( $v$ ) :

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda} \quad (12)$$

kde  $\lambda_0$  .....je vlnová délka světla ve vakuu

$\lambda$  ..... je vlnová délka světla v daném prostředí

V optickém prostředí s indexem  $n$  je vlnová délka  $n$ -krát menší než ve vakuu:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (13)$$

#### 1.2.1.6 Interference světla (skládání)

Při interferenci světla se nejvíce projevují jeho vlnové vlastnosti. Pokud vlnění přicházejí do určitého bodu z různých zdrojů v daném bodě se skládají (např. duhové zabarvení mýdlových bublin). U elektromagnetického vlnění se sčítají okamžité výchylky magnetické a elektrické složky. Pomocí interference se ve fyzice dokazuje vlnová povaha zkoumaného fyzikálního jevu. Anglický fyzik Thomas Young zkoumal interferenci světla a došel k závěru, že k interferenci světla dochází jestliže jsou současně splněny tyto podmínky:

1. dvě a více vlnění
  2. všechna vlnění mají stejnou frekvenci (interference je výraznější než u vlnění, které nemají stejnou frekvenci)
  3. mezi střetávajícími se vlnění je vytvořen fázový (dráhový) rozdíl
  4. vlnění jsou koherentní (za koherentní se považují taková světelná vlnění, která mají stejnou frekvenci a jejichž fázový rozdíl se v daném bodě s časem nemění)
- [6]

Např. koherence dosáhneme rozdělením světelného paprsku z jediného zdroje na dva paprsky. Tyto paprsky se pak v bodě interference střetávají z dráhovým rozdílem, který musí být malý (řádově  $10^{-2}$  mm).

Světelné vlnění se v prostředí o indexu lomu  $n > 1$  šíří menší rychlostí než ve vakuu. Z toho to důvodu se zavádí nová veličina – optická dráha ( $l$ ), je definována jako vzdálenost, kterou by urazilo světlo ve vakuu za stejnou dobu jako v daném prostředí.

$$l = n s \quad (14)$$

kde  $s$  ... je skutečná dráha

Výsledkem interference je zesílení světla v místě, kde vzniká interferenční maximum a zeslabení v místě kde vzniká interferenční minimum.[8] Interferenční maximum se nachází v místech, kde se setkávají koherentní světelná vlnění se stejnou fází, interferenční minimum je v místech v nichž mají tato vlnění opačnou fázi. Nejlépe lze interferenci pozorovat na velmi tenkých vrstvách.

#### **1.2.1.7 Difrakce světla (ohyb)**

Difrakce se projevuje po dopadu na okraj překážky tím, že se světlo šíří za překážku i do oblasti geometrického stínu, do prostoru kam by na základě přímočarého šíření nemělo světlo proniknout. Ohyb lze pozorovat např. když prochází světlo štěrbinou, jejíž šířka je srovnatelná s vlnovou délkou světla. Za štěrbinou se na stínítku objeví difrakční obrazce.[6]

#### **1.2.1.8 Polarizace světla**

Světlo má složku elektrickou, kterou představuje vektor intenzity elektrického pole  $E$ , a magnetickou, kterou tvoří vektor magnetické indukce  $B$ . Obě složky jsou

navzájem na sebe kolmé a navíc jsou ještě kolmé na směr šíření světla. U nepolarizovaného světla kmitá vektor  $E$  (i vektor  $B$ ) zcela nahodile. Pokud vektor kmitá stále v jedné rovině, je světlo lineárně polarizované. Přirozené světlo lze polarizovat odrazem a lomem, dvojlomem a polaroidem.

### **1.2.2 Zobrazování optickými soustavami**

Při popisu šíření světla a vytváření obrazů předmětů se používá geometrická optika. Využívá se zde tedy paprskového modelu světla, kde se vlnový charakter světla zanedbává. Pro světlo a světelné paprsky potom platí zákon přímočarého šíření světla, zákon odrazu a lomu a princip o nezávislosti chodu jednotlivých paprsků.

#### **1.2.2.1 Základní pojmy**

##### ***Paprsek***

Udává směr šíření paprsku, je to přímka kolmá na vlnoplochu.

##### ***Optická soustava***

Uspořádaná optická prostředí, která mění směr paprsků. Ke změně směru paprsků dochází na optické ploše, která je tvořena rozhraním optických prostředí.

##### ***Obraz***

Množina bodů ve které se zdánlivě nebo skutečně protínají paprsky. Paprsky vycházejí z jednotlivých bodů předmětu a procházející zobrazovacím zařízením.

##### ***Skutečný obraz***

Pokud optická soustava vytvoří sbíhavý svazek paprsků vzniká skutečný (reálný) obraz. Paprsky se protínají za soustavou tento obraz lze zachytit na stínítku.

### ***Obrazový prostor***

Prostor, kde může ležet obraz předmětu, prostor za optickou soustavou.

### ***Neskutečný obraz***

Vzniká pokud optická soustava vytvoří rozbíhavý svazek paprsků, které se zdánlivě protínají před soustavou. Obraz nelze zachytit na stínítku.

### ***Předmět***

Fyzikální objekt z jehož jednotlivých bodů vycházejí rozbíhavé svazky paprsků, které po vstupu do optického zařízení vytvářejí obraz.

### ***Předmětový prostor***

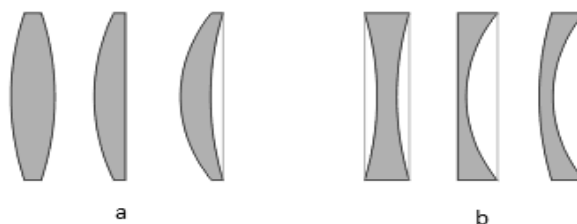
Prostor ve kterém se nachází předmět, před optickou soustavou.

### ***Parxiální paprsky***

Paprsky, které svírají s osou velmi malé úhly, leží v tzv. parxiálním (Gaussově) prostoru. [4]

#### **1.2.2.2 Zobrazení čočkou**

Čočky bývají většinou vyrobeny ze skla nebo z plastu. Materiál je charakterizován indexem lomu větším než jedna a indexem absorpce (udává míru útlumu procházejícího záření v dané látce absorpcí), který je pro vlnové délky v rozsahu použitelnosti čočky blízko k nule. Jednoduchá čočka se skládá ze dvou funkčních ploch, kdy alespoň jedna z ploch není rovinná.



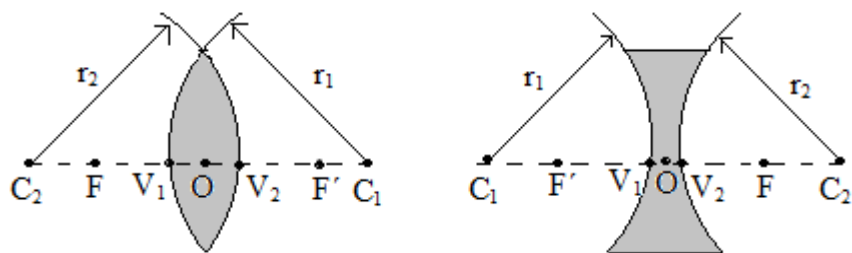
Obr. 12 a) tvary spojek, b) tvary rozptylek

Čočky dělíme na spojné-spojky (konvexní čočky) a rozptylné-rozptylky (konkávní čočky). Spojné čočky mění rovnoběžný svazek paprsků po průchodu na sbíhavý, jsou ve středu tlustější. Rozptylné čočky mění rovnoběžný svazek paprsků po průchodu na rozbíhavý, jsou ve středu tenčí. Příklady tvarů čoček znázorňuje obrázek 12. Při zobrazování pomocí čoček se uplatňuje lom světelných paprsků.

### Zobrazování čočkami

Pro zobrazování čočkami zavádíme pojmy:

- středy křivosti  $C_1, C_2$  (středy kulových ploch ohraničujících čočku)
- poloměry křivosti  $r_1, r_2$  (poloměr křivosti optických ploch ohraničujících čočku)
- optická osa (přímka procházející středy  $C_1$  a  $C_2$ )
- vrcholy čočky (průsečík optické osy s optickými plochami ohraničujícími čočku)
- předmětový prostor (prostor, kde světlo vstupuje do čočky)
- obrazový prostor (prostor, kde světlo vystupuje z čočky)
- ohnisko čočky  $F, F'$  (je bod na optické ose, v němž se světelné paprsky rovnoběžné s optickou osou protínají po průchodu čočkou. Naopak paprsky jdoucí ohniskem se po průchodu čočkou lámou rovnoběžně s optickou osou)
- ohnisková vzdálenost (obrazová – vzdálenost  $F'O$ , předmětová vzdálenost  $FO$ )
- tenká čočka (její tloušťka je zanedbatelná vůči její ohniskové vzdálenosti)
- tlustá čočka (její tloušťka není zanedbatelná vůči její ohniskové vzdálenosti)[6]



Obr. 13 Vyznačení základních pojmů a) u spojky b) u rozptylky



Pokud je před čočkou a za čočkou stejné optické prostředí pak platí že  $f = f'$  a obě vzdálenosti nazýváme ohniskovou vzdáleností čočky. Označuje se jako  $f$  a platí pro ní vztah:

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (15)$$

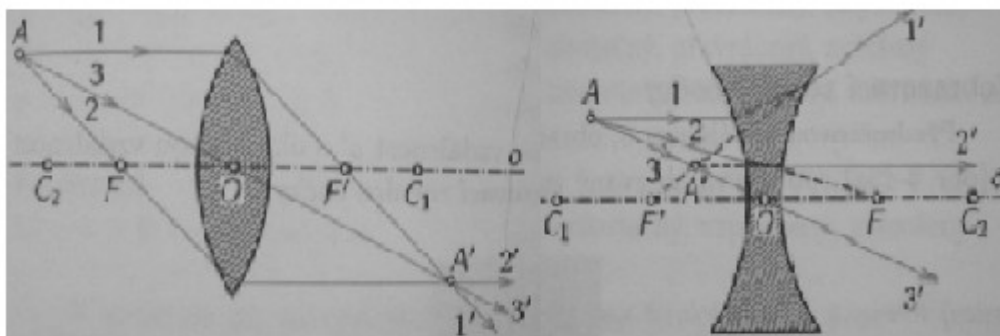
kde  $n_1, \dots$  index lomu prostředí

$n_2, \dots$  index lomu materiálu z něhož je čočka

Při výpočtu ohniskové vzdálenosti platí, že optické plochy vypuklé (vzhledem ke svému okolí) mají poloměr křivosti kladný a duté záporný. Jestliže  $n_2 > n_1$  platí pro spojky  $f > 0$  a pro rozptylky  $f < 0$ . Převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti je optická mohutnost.

$$\varphi = 1/f \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (16)$$

Jako vedlejší jednotka optické mohutnosti se používá dioptrie (dioptrie je optická mohutnost s ohniskovou vzdáleností 1m). Při konstrukci obrazu používáme dva ze tří parxiálních paprsků, třetí slouží pro kontrolu (Obr.14).



Obr.14 Lom tří vyznačených paprsků spojkou a rozptylkou

Pro zobrazování pak platí:

1. u spojek se paprsek rovnoběžný s optickou osou se láme do  $F'$ , u rozptylek paprsek rovnoběžný s optickou osou se láme tak, že v prodloužení prochází  $F'$

2. u spojek paprsek procházející F se láme rovnoběžně s optickou osou, u rozptylek paprsek mířící do F se láme rovnoběžně s optickou osou
3. paprsek procházející optickým středem nemění svůj směr

### Zobrazovací rovnice pro čočky

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad (17)$$

kde  $a$  ... předmětová vzdálenost, vzdálenost optického středu od bodu A ležícího na optické ose

$a'$  ... obrazová vzdálenost, vzdálenost optického středu od bodu A' ležícího na optické ose

Je-li vzdálenost  $a$  před čočkou pak je kladná, záporná za čočkou. U vzdálenosti  $a'$  je tomu naopak.[6]

### Příčné zvětšení čočky

Poměr výšky obrazu  $y'$  a výšky předmětu  $y$  platí:

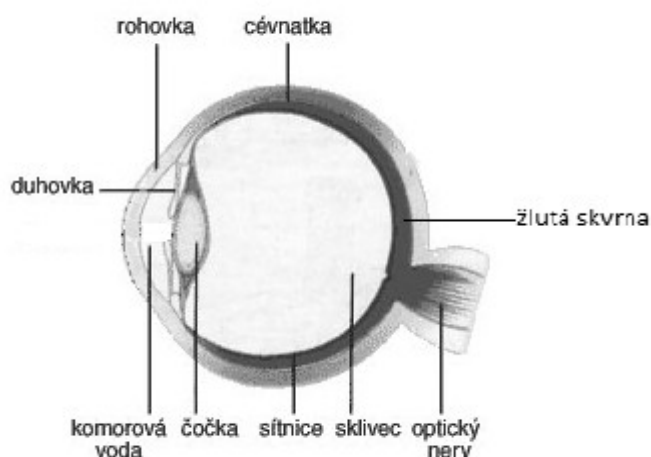
$$Z = \frac{y'}{y} = \frac{-a'}{a} \quad (18)$$

Při použití rovnice pro čočky získáme vztah:

$$Z = \frac{(a' - f)}{f} = \frac{f}{(a - f)} \quad (19)$$

### 1.2.3 Lidské oko

Lidské oko je optická soustava tvořená rohovkou, očním mokem, duhovkou, čočkou, sklivcem a sítnicí (Obr.15). Paprsek nejprve prochází rohovkou, která má průměr přibližně 12 mm a tloušťku uprostřed 0.6 mm. Její index lomu je 1,376, proto na rozhraní vzduch-rohovka dochází k výraznému lomu. Za rohovkou se nachází přední komora vyplněná tekutinou s indexem lomu 1,336. V komoře se nalézá také duhovka, která podle intenzity světla mění svůj průměr od 2 mm-8 mm, plní tak funkci vstupní clony. Dále paprsek pokračuje přes čočku. Čočka má vrstevnatou strukturu, je pružná a uchycena na svalových vláknech to umožňuje měnit její tvar a tloušťku - optickou mohutnost. Za čočkou se nachází zadní komora s tekutinou o indexu lomu 1,336. Paprsek pak dopadá na sítnici oka.



Obr. 15 Schéma lidského oka

Na sítnici oka se nacházejí fotocitlivé buňky tyčinky a čípky. Při dopadu fotonu světla na fotocitlivou buňku dochází k jejímu podráždění a vyslání signálu do mozku, výsledkem je zrakový vjem. Čípky zprostředkovávají barevné vidění, vyskytují se ve střední části sítnice o průměru přibližně 3mm, oblast se nazývá žlutá skvrna. Uprostřed ní se nachází oblast zvaná fovea, kde nejsou žádné tyčinky, vzniká zde nejvyšší kvalita zrakový vjem. Tyčinky jsou citlivější než čípky, je jich několikrát více, nerozlišují však barvy. Oko má řadu zvláštních funkcí, které z něho činí kvalitní zobrazovací systém.[5]

### Akomodace oka

Je schopnost měnit optickou mohutnost oka. Optická mohutnost oka se pohybuje mezi 60 – 70 dioptriemi. Optická mohutnost oka se mění tak , aby předměty nacházející se v různých vzdálenostech se zobrazili vždy na sítnici. Pokud pozorovaný předmět leží blízko, čočka má velké zakřivení a akomodace oka je větší a naopak. Akomodace oka má však své hranice:

- blízký bod – nejbližší bod, který oko vidí při největší akomodaci
- vzdálený bod – nejvzdálenější bod , které oko vidí bez akomodace (u zdravého oka v nekonečnu)
- konvekční zraková vzdálenost- nejmenší vzdálenost pro pozorování předmětů po delší dobu bez větší únavy oka (dohoda 25 cm]

### Adaptace oka

Adaptace oka umožňuje správnou činnost pro velké rozpětí světelných toků. Rozdílná citlivost tyčinek a čípků.[5]

### Rozlišovací mez oka

Oko rozliší dva body tehdy je-li úhlová vzdálenost větší než určitá limitní hodnota. Tuto hodnotu nazýváme rozlišovací mez. Rozlišovací schopnost oka je pak převrácená hodnota rozlišovací meze. Dva blízké body je schopné zdravé oko rozlišit ve vzdálenosti (úhlové) 1'.

$$P_z = \frac{y}{f} = \frac{0,005[mm]}{17[mm]} = 0,0003 rad = 1' \quad (20)$$

kde  $p_z$  ... rozlišovací mez oka

$y$  .... průměr buněk (čípku) ve žluté skvrně

$f$  .... vzdálenost sítnice od obrazového uzlového bodu [9]

## 1.3 Neviditelnost

Každý z nás občas zatouží být neviditelný. Neviditelnost byla prozatím doménou science-fiction, v průběhu několika posledních let se však stala předmětem seriózního vědeckého bádání. Neviditelnost má největší význam pro použití ve vojenství, ale i v lékařství např. při zneviditelnění ruky chirurga by byl vidět pouze skalpel a operace by se stala přehlednější.

Základní podmínkou vidění je světlo. Dopadá-li světlo na rozhraní dvou různých optických prostředí (např. vzduch – předmět), pak se částečně láme a částečně odráží podle zákonů lomu a odrazu (viz kapitola 1.2.1.4). Z každého bodu předmětu (objektu) vycházejí všemi směry světelné paprsky, které zachytí oko. Předmět se tedy stává viditelným. Jinými slovy lze říci, že na povrchu předmětů dochází k odrazu světla, k absorpci světla v jejich hmotě, k rozptylu světla. Všechny tyto jevy využíváme k vizuální orientaci v prostoru a ke sledování předmětů ve svém okolí. Pokud by se paprsky od nějakého objektu neodrazily, ale byly propustily, stal by se objekt neviditelným.[10]

Existuje několik možností jak dosáhnout neviditelnosti. Nejstarší formou je maskování. Známé je také zneviditelnění průhledných látek ponořením do prostředí, které má stejný index lomu (např. sklo ve vodě). Neviditelnost lze rozdělit na digitální a optickou. Velký vývoj v této oblasti přislubují metamateriály.

### 1.3.1 Optické kamufláže ( maskování )

Maskování je nejstarší formou pokusu o neviditelnost. Již pravěký člověk postřehl, že mamut na sněhové pláni je vidět lépe než šavlozubý tygr v džungli. Maskování je otázkou přežití i v přírodě. Některé vyšší organismy jsou schopné měnit barvu kůže v závislosti na barvě prostředí např. chameleon. U chameleona změnu barvy vyvolávají chromatocyty, které jsou umístěné ve třech vrstvách podkožní tkáně. První

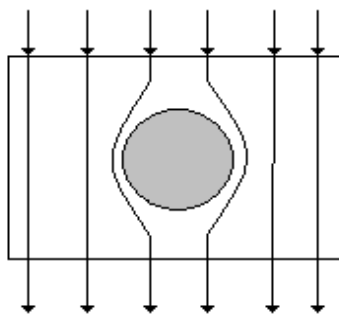
vrstva je vytvořena buňkami žlutými a červenými, druhá modrými a bílými a třetí vrstva buňkami černými. Tyto buňky mají výběžky, které mění svoji velikost a přibližují se, nebo oddalují od pokožky, která je průhledná a proto jsou vidět barevné buňky. Dalším příkladem organismu, který je schopen měnit barvu v závislosti na okolí, je chobotnice, ta umí napodobit dokonce i vícebarevný podklad.

Maskování se používá také v vojenství. Existují desítky, spíše stovky maskovacích vzorů a nátěrů pro různá prostředí i roční období. Při maskování vojenské techniky lze použít promítání pozadí na maskovaný předmět. Nevýhodou je maskování pouze z jednoho směru, dále jsou zde problémy s jasnou a bílou barvou, nelze ji vytvořit na barevném podkladu. Předností tohoto druhu maskování je nízká cena. [10]

### 1.3.2 Princip neviditelnosti

Zneviditelnit reálný předmět je složitý problém, který je třeba řešit jinými způsoby než maskováním. Jak už je uvedeno výše předmět vidíme proto, že odráží světlo, které zachytí naše oko. Pokud by materiál světlo neodrazil, ale propustil, stal by se neviditelným.

Světlo nemůže procházet skrytým předmětem, ale musí ho obejít, aniž by podle pozorovatele změnilo barvu a intenzitu. Jako příklad můžeme uvést vodu vířící kolem kamene. Voda kamen obtéká, víří kolem něj a teče dál, jako by ji předtím nic nestálo v cestě. Nahradíme-li vodu světlem nevidíme, že tam něco je, protože světlo předmět obtéká. (Obr.16). [21]



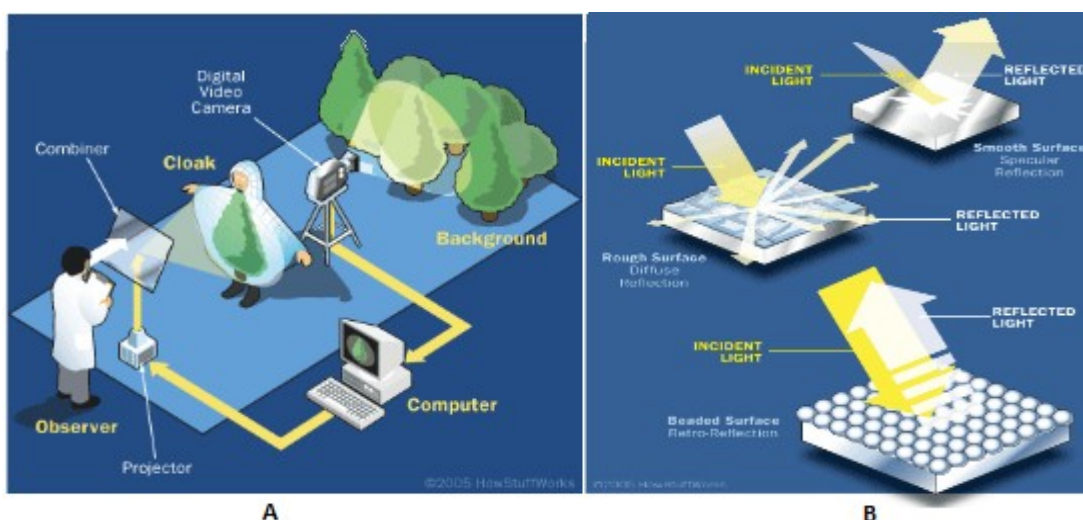
*Obr.16 Obtékání světla*

### 1.3.3 Digitální neviditelnost

Princip digitální neviditelnosti je založen na snímání intenzity světla na místě jeho dopadu na skrývaný předmět a vysíláním stejného světla směrem k pozorovateli.

Tento princip má několik nedostatků ztěžujících jeho použití. Prvním z nich je nutnost napájení energií, mezi další patří špatná optická kvalita výsledného produktu, pomalá reakce na změny, vysoká cena, technické řešení sledování dopadajícího světla (intenzita, vlnové délky, směr dopadu...). Výhody systému spočívají v relativní dostupnosti optických senzorů a zdrojů světla, řešení rutinních problémů elektrotechniky, teoretická možnost řešit i prostorově složité předměty, řešit stíny a předměty s proměnnými tvary.[10]

V roce 2004 byla vyzkoušená technologie X'tal Vision. Plášť (nebo jiná forma) je vyroben ze světlo odrážejícího retro-reflective materiálu. Když na tento materiál dopadne světlo odráží se přesně ve stejném úhlu zpět. Kamera nasnímá pozadí objektu, předá obraz do počítače, ten do projektoru, odtud se vyše obraz do polopropustného zrcadla (Obr 17). Takto odražený stereoskopický obraz pozadí se promítne vpředu na plášť. Obraz se neobjeví na žádném jiném předmětu, jen na tom, který je pokryt retro-reflective materiálem. Člověk v plášti se jeví tedy jako průhledný.[28]



Obr. 17 A) neviditelný plášť B) retro-reflective materiál odraz světla [28]

### **1.3.4 Optická neviditelnost**

Diplomová práce se zabývá podrobněji optickou neviditelností. U optické neviditelnosti je dopadající světlo vedeno pomocí světlovodů na druhou stranu předmětu obrácenou k pozorovateli (Obr.16). Světlo si zachovává své spektrální složení a neexistuje zde opoždění mezi akcí a reakcí soustavy, což lze považovat za výhodu. Světlo se však zpracovává hůře než elektrický signál, proto je nezbytné používat nestandardní optická řešení.

Důležitou vlastností optických vláken je jejich kompatibilita s textilními vlákny. Optická vlákna jsou v současnosti používány převážně pro přenos informací zejména v telekomunikační technice dále v osvětlovacích tělesech. Jsou vyrobeny ze skla nebo polymeru, průměry vláken se pohybují podle požadavků od několika mikrometrů až po stovky mikrometrů. Jejich vlastnosti jsou dány chemickou strukturou. Princip optického vlákna a vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 1.1.[10]

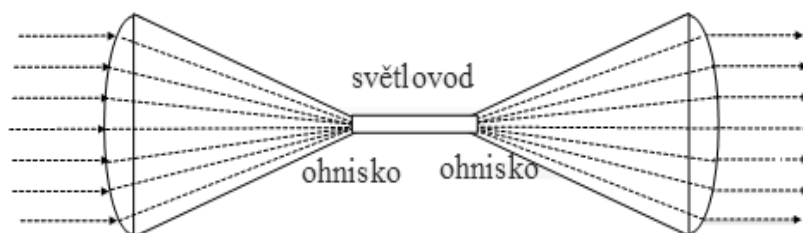
Tento způsob zneviditelnění sebou přináší řadu problému, které je nutné řešit. Je to především hmotnost soustavy, počet pixlů, organizace světlovodů, sestavení čoček do textilního útvarů.

#### **1.3.4.1 Technické problémy při zneviditelnění soustavy – hmotnost soustavy**

Při přímém použití optických vláken k zneviditelnění plochy o 1 m<sup>2</sup> bude mít tato soustava hmotnost víc než jednu tunu v závislosti na hustotě materiálů, ze kterých jsou vyrobena optická vlákna. Toto využití je proto nereálné. Vyvstává tedy otázka, jak snížit počet světlovodů na přijatelné množství a jak soustředit paprsky do světlovodů.

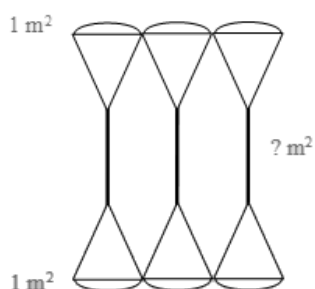
Řešením by mohl být systém (Obr.18), který se skládá ze dvou stejných čoček a optického vlákna. Tato soustava je opticky symetrická, to je výhodné, protože předmět se pak po optické stránce chová ze všech stran stejně.[10]





Obr. 18 Systém tvořený dvěma čočkami a optickým vláknem [10]

Počet použitých optických vláken na plochu jednoho metru nám u soustavy klesne přibližně ze 127 milionů (bude-li se uvažovat poloměr optického vlákna  $r = 0,05\text{mm}$ , poloměr čočky  $R = 5\text{mm}$  a hustotu skla) na 12 700, což je přibližně 10 000 krát méně. Dojde tedy ke snížení hmotnosti soustavy na přijatelných 200g.



Obr. 18 Schéma soustavy

$R$  ... poloměr čočky

$r$  ... poloměr optického vlákna

$n$  ... počet čoček na metr čtverečný

$$n = 1/(\pi \cdot R^2)$$

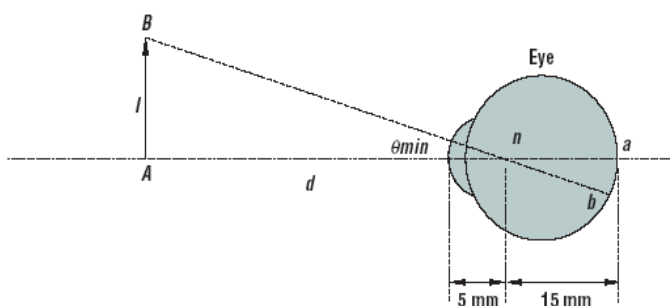
$s$  ... celková plocha řezu optického vlákna

$$s = r^2/R^2$$

#### 1.3.4.2 Technické problémy při zneviditelnění soustavy – počet pixlů

Pixel je obrazový prvek, v našem případě tedy čočka. Platí že, čím více pixlů, tím větší obrazová kvalita. Počet pixlů potřebný pro dobré rozlišení je dán konstrukcí lidského oka (Obr.19). Vzdálenost rozlišitelných bodů je  $d/3400$  (např. objekt má délku 1mm a pozorujeme ho ze vzdálenosti 3,4m). Rozlišovací schopnost oka je popsána v kapitole 1.2.3.

Při pozorování plochy  $1\text{m}^2$  ze vzdálenosti  $10\text{m}$  je potřeba cca 115,600 obrazových bodů. Maximální vzdálenost obrazových bodů je  $2,9\text{mm}$ . Velikost obrazových bodů musí být alespoň  $(2,9\text{mm})^2$ .

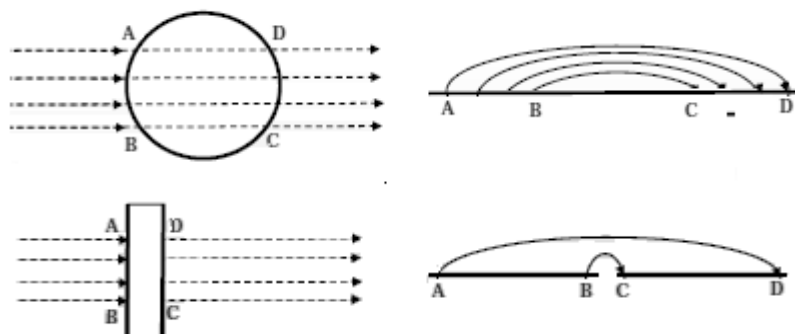


Obr.19 Lidské oko [10]

Pokud chceme dosáhnout neviditelnosti u člověka (jeden člověk –  $2\text{m}^2$ ) z deseti metrů pak je nutno použít asi 250 obrazových bodů.[10]

### 1.3.4.3 Organizace světlovodů

Pozorovatel vnímá světlo v určitém prostorovém úhlu. Čím větší vzdálenost od pozorovaného předmětu, tím menší úhel pozorování a pozorovatel vnímá téměř rovnoběžné paprsky světla. Takže při zneviditelnění pro větší vzdálenosti lze zjednodušeně říci, že se jedná o maskování proti rovnoběžným paprskům světla ( Obr. 19 ).

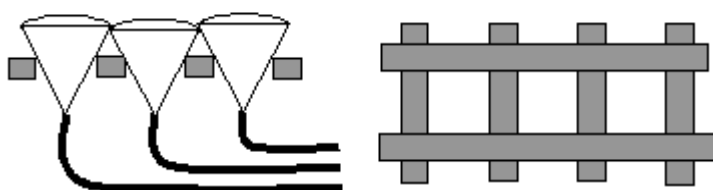


Obr. 20 Maskování válečku, deska [10]

Pokud budeme chtít zneviditelnit člověka, můžeme si ho představit jako model válců. U válce umíme řešit zneviditelnění. Teoreticky tedy umíme zneviditelnit i člověka.

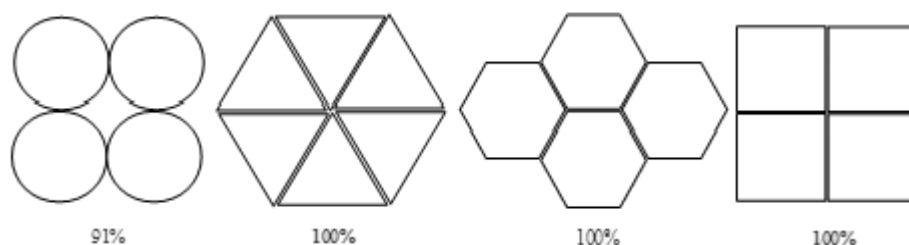
#### 1.3.4.4 Sestavení čoček a světlovodů do textilního útvaru

V několika posledních letech je v textilním výzkumu věnována pozornost optickým vláknům a to především v souvislosti s rozvojem inteligentních textilií. Optická vlákna se do textilií přímo zatkávají, lze je však i upevňovat na povrch textilie pomocí jednoduchých stehů (např. řetízkových). Na obrázku 20 je znázorněno schéma sestavení čoček a optických vláken do textilního materiálu.



Obr. 21 Schéma sestavení čoček a optických vláken v textilií [10]

Dalším technickým problémem při řešení neviditelnosti jsou tvary čoček. Obrázek 22 zobrazuje různé tvary čoček a uvádí jak zaplní textilií.[10]



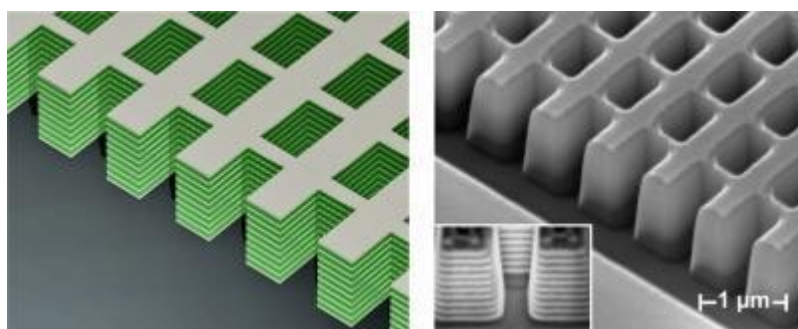
Obr. 22 Tvary čoček [10]

### 1.3.5 Metamateriály

Metamateriály jsou kompozitní kovové materiály. Jejich strukturu lze uspořádat tak, aby jimi procházelo světlo. Toho se dosahuje ovlivňováním vztahu mezi elektrickým polem, magnetickým polem a směrem toku světla. V přírodě se metamateriály nenachází, jejich zvláštností oproti klasickým látkám je negativní index lomu – světlo se ohýbá v opačném směru. Pro dosažení negativního indexu lomu musí mít strukturu menší než je vlnová délka světla. Při výrobě metamateriálu pomáhá tedy nanotechnologie. Metamateriály lze rozdělit na typ 2D a 3D (Obr. 23).[20]

V posledních dvou letech se objevilo několik zpráv o překonání neviditelnosti právě díky metamateriálům. Metamateriál vede světlo kolem dutiny, aniž by do ní vniklo. Každé těleso umístěno v dutině (obaleno metamateriálem) se tedy stává neviditelným. Všechny paprsky přicházející z jednoho směru se šíří kolem dutiny a pak se znovu narovnají, jako by jim nic nestálo v cestě (Obr.16).

Neviditelnost se z oblasti science-fiction postupně přesouvá do reality. Má však ještě své omezení. Dokáže ohýbat světlo jen v určitém spektru vlnových délek. A pokud by se skryl člověk, pak by nic neviděl. K dokonalé neviditelnosti tedy vede ještě dlouhá cesta.[31]



Obr 23. Struktura metamateriálu [31]

Neviditelnost je v dnešní době aktuálním tématem, touto problematikou se zabývá řada pracovních týmů na celém světě. [15, 16, 17, 18, 19]

## **2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### **2.1 Příprava optických čoček pro textilní systémy**

Vzhledem k tomu, že přímé použití optických vláken k výrobě neviditelnosti textilie je nereálné, se přešlo na systém složený ze dvou stejných čoček a optického vlákna (popsáno v kapitole 1.3). Tato část diplomové práce se bude zabývat přípravou optických čoček pro textilní systémy.

#### **2.1.1 Příprava optických čoček z dentakrylu**

Dentakryl je dvousložková metylmetakrylátová licí pryskyřice, určená pro technické použití. Polymeruje samovolně tzv. chemickou iniciací po smíšení obou složek. Má velmi dobré izolační vlastnosti, vysokou mechanickou pevnost a dokonalou tepelnou izolaci. Skladuje se v suchu a temnu při teplotě od 5°C do 25°C v dobře uzavřeném obalu.

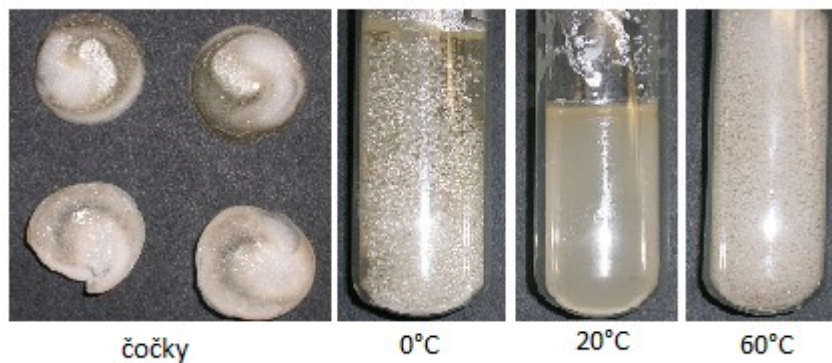
Snadná zpracovatelnost pryskyřice dentakryl umožňuje jeho široké použití v různých průmyslových oborech. Svými vlastnostmi je předurčen k využití v elektro-průmyslu. Ve strojírenství se pak uplatňuje např. při zalévání vodících desek nárazníků. Používá se také k upevňování výbrusů v metalurgických laboratořích.

##### **2.1.1.1 Postup při výrobě optických čoček**

Nejprve se v plastovém kelímku smísilo odměřené množství prášku a tekutiny dentakrylu. Mísicí poměr byl 100 dílů prášku na 50 dílů tekutiny. Poté se směs míchala skleněnou tyčinkou do té doby než měla medovou konzistenci. Pomocí injekční stříkačky se směs dávkovala do keramické formy a do tří zkumavek. Keramická forma s dentakrylem se nechala odležet do druhého dne při pokojové teplotě, poté byly čočky

Optické systémy pro textilie

vylopány. U dentakrylu ve zkumavkách byla použita různá teplota při polymerizaci: 0°C, 20°C a 60°C.



Obr. 24 Čočky z dentakrylu

### Výsledek

Čočky vyrobené tímto způsobem, neměly požadované optické vlastnosti. Největší problém spočíval v krystalkách, které se vytvořily v dentakrylu během tuhnutí (Obr.24). Ani polymerizace při různých teplotách problém nevyřešila.

### 2.1.2 Příprava optických čoček tavením polymerního granulátu

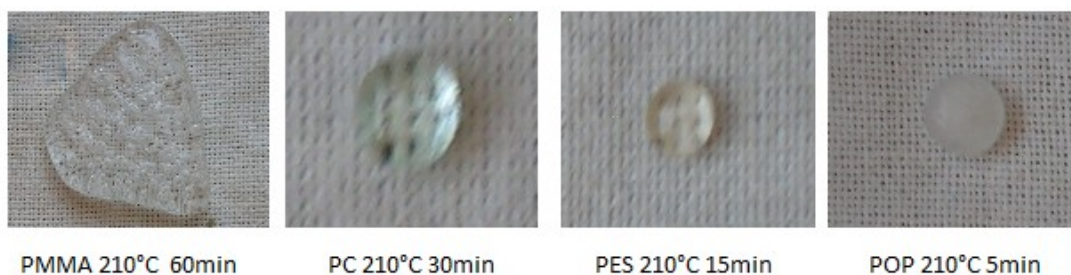
Jako materiál na výrobu optických čoček tavením byly použity granuláty z polykarbonátu, polypropylen, polyesteru a plexiskla. V tabulce č.1 jsou uvedeny teploty tání použitých polymerů.

Tabulka č.1 Teploty tání

Polymer	Teplota tání [°C]
PC - polykarbonát	226-266
POP - polypropylen	114-138
PES - polyester	225
PMMA - plexisklo	160-200

### 2.1.2.1 Postup při výrobě optických čoček

Polymerní granule byly položeny na předem nahřátou bavlněnou textilií. Poté byly vloženy do sušárny s definovanou teplotou. Ze sušárny byly odebírány v časových intervalech 5min, 10min, 15min, 30min, 45min a 60min, takto byly vytvořeny časové řady pro různé teploty. Cílem bylo nalézt ideální dobu a teplotu tavení.



*Obr. 25 Granulát po tavení*

### Výsledek

Polypropylen měl po tavení sice ideální tvar, ale nebyl transparentní. U plexiskla se objevilo velké množství vzduchových bublin. Nejlepšího výsledku se dosáhlo u granulátu z polyesteru a polykarbonátu (Obr. 25). U polyesteru byla za nejvhodnější způsob tavení zvolena doba 15 minut při teplotě 210°C a u polykarbonátu doba 30 minut při 210°C.

Přestože se u PES a PC dosáhlo nejlepších výsledků, obsahovaly malé množství vzduchových bublinek, které by ovlivňovaly optické vlastnosti čočky. Při ponechání v sušárně po delší dobu začalo docházet k degradaci polymeru, jež se projevila hnědnutím. Tato výroba by byla časově a energeticky náročná, a navíc by nepřinesla požadovaný výsledek.

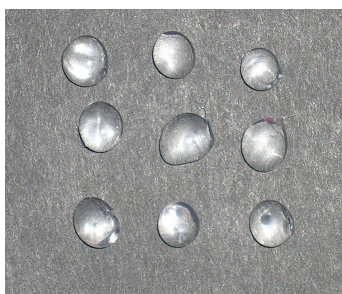
### 2.1.3 Příprava optických čoček pomocí tavné pistole

K výrobě čoček byla použita lepící tavná pistole. Jako náplň do tavné pistole sloužil transparentní lepící tmel (kopolymer etylene/vinylacetate 18 %). Optické čočky byly vyráběny dvěma způsoby:

- vytvářením kapek na hliníkovou folii
- vytvářením kapek do vody

#### 2.1.3.1 Vytvářením kapek na hliníkovou folii

Na hliníkovou folii se pomocí tavné pistole nanasla kapka transparentního lepícího tmelu a ihned se zchladila ve studené vodě. Pokud se neprovedlo rychlé zchlazení, kapka zmatnila (pomalá krystalizace). Po zchlazení se čočka odloupala z hliníkové folie (Obr.26).



*Obr. 26 Čočky vyrobené vytvářením kapek na hliníkovou folii*

#### Výsledek

Tímto způsobem se povedly vyrobit čočky o průměru cca 5mm a tloušťce cca 3mm. Jejich ohnisková vzdálenost byla přibližně 1cm, což by odpovídalo sto dioptriím. Optické vlastnosti by tedy byly pro náš účel dostačující.



### 2.1.3.2 Vytvářením kapek do vody

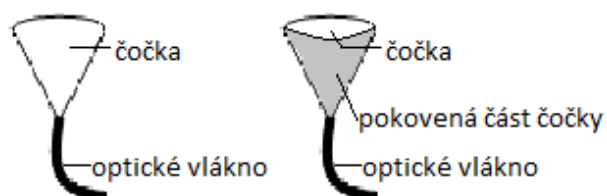
Čočky byly vytvářeny tak , že tavná pistole byla umístěná 5cm nad vodní hladinu studené vody. Postupně se vytvářely kapky lepicího tmelu, které se nechaly volně padat do nádoby s vodou. Pak byly čočky vyjmuty z vody a nechaly se okapat. Při vytváření kapek z větší vzdálenosti než 5cm docházelo k jejich deformaci při styku s vodní hladinou.



*Obr.27 Čočky vyrobené kapáním do vody*

### Výsledek

Výhodou takto vzniklých čoček je jejich trychtýřový tvar (Obr.27), který umožňuje jednodušší upevnění na optická vlákna. Čočka má průměr cca 3,5 mm a délku asi 2 cm. Nevýhodou je, že světlo uniká ven ve spodní části trychtýře. Tento problém lze řešit pokovením-stříbřením (Obr.28).



*Obr. 28 Čočka s optickým vláknem*

## **2.1.4 Postříbření optických čoček**

Stříbřeny byly čočky vytvořené kapáním do vody. Důvod stříbření je popsán v předchozí kapitole 2.1.3.2. Stříbření bylo provedeno redukčním pokovováním. Princip spočívá ve vylučování kovového povlaku redukcí sloučeniny kovu vhodným činidlem.

Redukce probíhá pouze na povrchu předmětu a vzhled takto vyloučených povlaků je podstatně lepší než vzhled povlaku při pokovování kontaktním nebo při pokovováním ponorem. Chemicky lze vylučovat povlaky téměř všech kovů. Výhodou tohoto postupu pokovování je jednoduché zařízení a neomezená hloubková účinnost (možnost pokovení uvnitř dutin). Nevýhodou je menší rychlost a výměna lázně po jejím vyčerpání.

### **Postup stříbření čoček**

Nejprve byl postříbřený materiál (čočky) řádně očištěn čistým lihem a po té opláchnut v destilované vodě. Následovala aktivizace polymeru.

#### ***Aktivizace polymeru***

Aktivizace nebo-li zcitlivění spočívalo v ponoření v roztoku, který obsahoval:

- 20 g chloridu cínatého
- 34 g kyseliny solné koncentrované
- 5 ml destilované vody

Aktivizace se prováděla ve skleněné kádince po dobu tří minut. Poté by materiál vyjmut a opláchnut pod tekoucí vodou.

### **Příprava stříbricí lázně**

V 110 ml destilované vody se rozpustily 4g dusičnanu stříbrného, 10 ml tohoto roztoku se odlilo do jiné lahvičky. Do zbylých 100ml se kapal čpavek, čímž vznikla hustá hnědočerná sraženina. Za stálého míchání se přidával čpavek až se sraženina začala rozpouštět. V okamžiku, kdy byl roztok slabě nažloutlý (před úplným rozpouštěním sraženiny), se čpavek přestal přidávat.

V další kádince se mezi tím rozpustily 3g hydroxidu draselného ve 100ml destilované vody, potom se roztok smísil z roztokem dusičnanu. Opět vznikla tmavá sraženina, která se rozpustila přidáním čpavku. Přililo se 10 ml roztoku, který se na začátku odlil do jiné lahvičky. Tím vznikla stříbricí lázeň.

Z lázně se redukovalo kovové stříbro 5% roztokem glukosy. V poměru 5 dílů stříbricí lázně a jeden díl glukosy. Do připravené lázně se vložily pinzetou očištěné a aktivované čočky tak, aby byla postříbřena pouze dolní část trychtýře (Obr. 29). Po minutě se čočka vyjmula a nechala volně oschnout.



*Obr.29 Postříbřené čočky*

### **Výsledek**

Stálost stříbra na čočce byla malá, postříbřená vrstva šla setřít přejetím prstů, to mohlo být způsobeno špatnými mechanickými vlastnostmi čoček.

## **2.2 Analýza optického vlákna**

### **2.2.1 Infračervená analýza optického vlákna**

Infračervená spektrofotometrie je analytická metoda založená na schopnosti látky absorbovat elektromagnetické vlnění o vlnových délkách 800nm-1nm( $10\text{cm}^{-1}$ – $12500\text{cm}^{-1}$ ). Záření o těchto vlnových délkách nazýváme infračerveným zářením. Největší význam pro určování struktury látek má spektrum o vlnočtech  $500\text{cm}^{-1}$  –  $4000\text{cm}^{-1}$ .

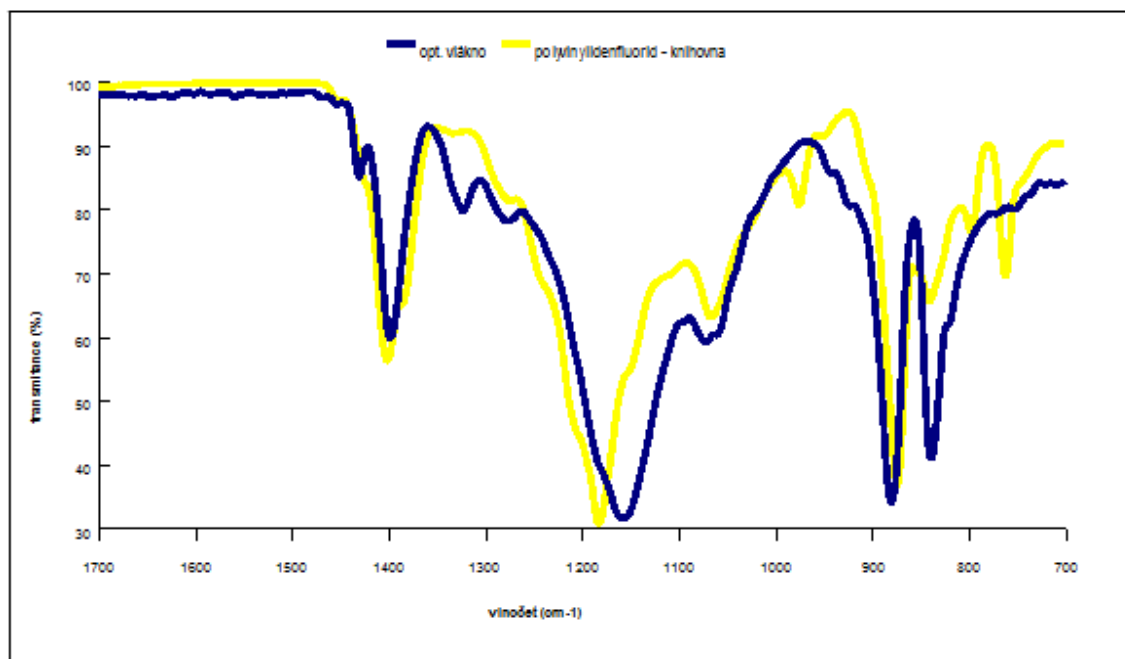
Když molekuly měřené látky absorbují energii z infračerveného záření dochází ke změně jejich vibračních a rotačních stavů. Infračervená absorpční spektra tak poskytují informaci o vibračních a rotačních pohybech molekuly. Ty jsou pro ni charakteristické, a proto lze spekter využít při identifikaci látek a určování struktury.

V infračerveném spektru se sleduje závislost transmitance nebo absorbance na vlnočtu absorbovaného záření. Výsledkem je infračervené spektrum látek. Spektrum je pásové, pásy ve spektru odpovídají různým typům vibračních přechodům.

Infračervené spektrum je charakteristické pro jednotlivé látky, neexistují dvě sloučeniny, které by měly zcela shodné IČ spektrem. Pomocí IČ spektra můžeme identifikovat danou látku s použitím knihovny spekter. Jednotlivé funkční skupiny se projevují ve spektru podobně, proto lze rozbořem IČ spektra zjistit přítomnost konkrétních funkčních skupin.[11]

### **Výsledek**

Infračervenou spektrometrií se zjistilo, že dostupné optické vlákno je vyrobeno z polyvinylidenfluoridu nebo látky velice podobného složení. Tato skutečnost byla potvrzena i DSC křivkou optického vlákna, kdy byla zjištěna teplota tání  $376\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na grafu 1 je znázorněno infračervené spektrum polyvinylidenfluoridu.

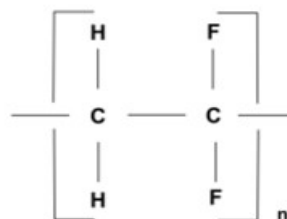


Graf 1 : Infračervené spektrum optického vlákna

### 2.2.1.1 Polyvinylidenfluorid (PVDF)

Je vysoce krystalický termoplastický fluoroplast ze skupiny teflonů. Jedná se o naprosto čistý polymer bez zbytkových částí monomerů. Neobsahuje žádná aditiva, stabilizátory, pigmenty ani jiné přísady. Ve srovnání s jinými fluoroplasty nabízí použití PVDF tyto výhody :

- snadná zpracovatelnost
- dobré mechanické vlastnosti
- nízká měrná hmotnost



### Vlastnosti

Polyvinylidenfluorid má dobrou chemickou odolnost a ve srovnání s PTFE je podstatně pevnější a tužší. PVDF je fyziologicky inertní. Jeho mez pevnosti je poměrně vysoká 54N/mm<sup>2</sup>, je odolný vůči UV záření. Má široký tlakový i teplotní rozsah. Dále

má vynikající rázovou houževnatost (i za nízkých teplot) a vynikající ošetruvzdornost. Je odolný vůči většině anorganických kyselin, alifatickým a aromatickým uhlovodíkům, organickým kyselinám, alkoholům a halogenovaným rozpouštědlům. Není odolný vůči silně zásaditým aminům a alkáliím. [23]

### **Použití**

Díky své vysoké čistotě je používán pro kontakt s velmi čistou vodou a s velmi čistými chemikáliemi. Také se používá pro antikorozi ochranu v chemickém průmyslu, dále pak ve farmaceutickém průmyslu, obaly potravin, barvy, v elektronice a v optice.

## **2.3 Modifikace optických vláken barvením**

Barvení optického vlákna bylo realizováno dvěma metodami:

- barvení optického vlákna disperzními barvivy
- barvení optického vlákna metodou sol-gel vrstev

Obsah barviva na optickém vlákne byl posuzován spektrofotometricky a počítačovým programem ImageJ. Dále byla zjišťována jeho distribuce v optickém vláknu.

### **2.3.1 Barvení optických vláken disperzními barvivy**

Disperzní barviva jsou nejdůležitějšími barvivy pro syntetická vlákna. Původně byla vyvíjena pro acetátové hedvábí. Molekula disperzního barviva je silně hydrofobní, to umožňuje dobrou rozpustnost v hydrofobním polymeru. Určitá minimální rozpustnost ve vodě je však nutná, neboť absorpce na povrch vlákna probíhá prostřednictvím vodného roztoku. Barvivo v lázni je dispergováno pomocí dispergátorů,

kteřé zvyšují tzv. nepravou rozpustnost rozptylováním molekul barviva do svých micel. Při barvení probíhají tyto procesy:

- rozpouštění barviva v barvicí lázni
- difúze barviva v barvicí lázni
- adsorpce barviva na povrch vlákna
- difúze barviva do nitra vlákna

Disperzní barviva se prodávají pod obchodním názvem Ostacetová. Pro získání optimálních vlastností je nutný správný výběr podskupin. Ostacetová barviva jsou typu P, E a S. [14]

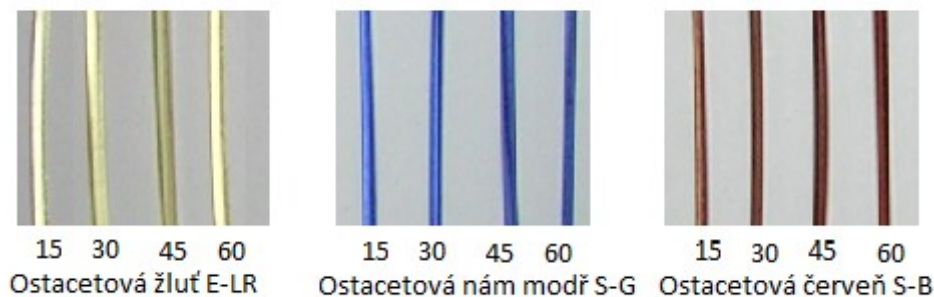
### **Postup barvení optických vláken disperzními barvivy**

K barvení byly použity barviva: Ostacetová nám. modř S-G

Ostacetová žluť E-LR

Ostacetová červeň S-B

Barvicí lázně se připravily o poměru 1:75 a koncentraci 1g/l. Barvení probíhalo ve zkumavkách za varu. Každá zkumavka obsahovala 4 optická vlákna, která se po 15 minutách postupně odebírala. Vlákná měli délku přibližně 10cm, průměr 1mm a hmotnost 0,068g. I hned po barvení byla optická vlákna opláchnuta ve vroucí vodě (Obr.30).



*Obr.30 Optická vlákna barvená disperzními barvivy*

### 2.3.1.1 Hodnocení vybarvení pomocí spektrofotometru

#### Spektrofotometr

Spektrometr vysílá tok rovnoběžných monochromatických paprsků o určité zářivé energii, při průchodu homogenní vrstvou (měřenou látkou) dochází k určité absorpci záření a z homogenní vrstvy vychází paprsek se sníženou zářivou energií. Velikost absorpce záření je závislá na délce vrstvy a na koncentraci absorbující složky.

Lambert - Beerův zákon nám vyjadřuje vztah mezi absorpcí záření, délkou vrstvy a koncentrací absorbující látky, můžeme ho matematicky vyjádřit jako:

$$A = \epsilon \cdot c \cdot l \quad (21)$$

Kde A...absorbance

c...koncentrace absorbující složky

l...délka absorbující vrstvy

$\epsilon$ ...molární absorpční koeficient, který je charakteristický pro danou látku

Lambert - Beerův zákon platí pouze v omezeném rozsahu. Platí když záření je monochromatické, absorbance je menší než 0,7, absorbující prostředí nepodléhat žádným změnám a v roztoku je jen jedna absorbující složka. Případné chyby se projeví pokud se vynese závislost absorbance na koncentraci odchylkou od lineární přímky.

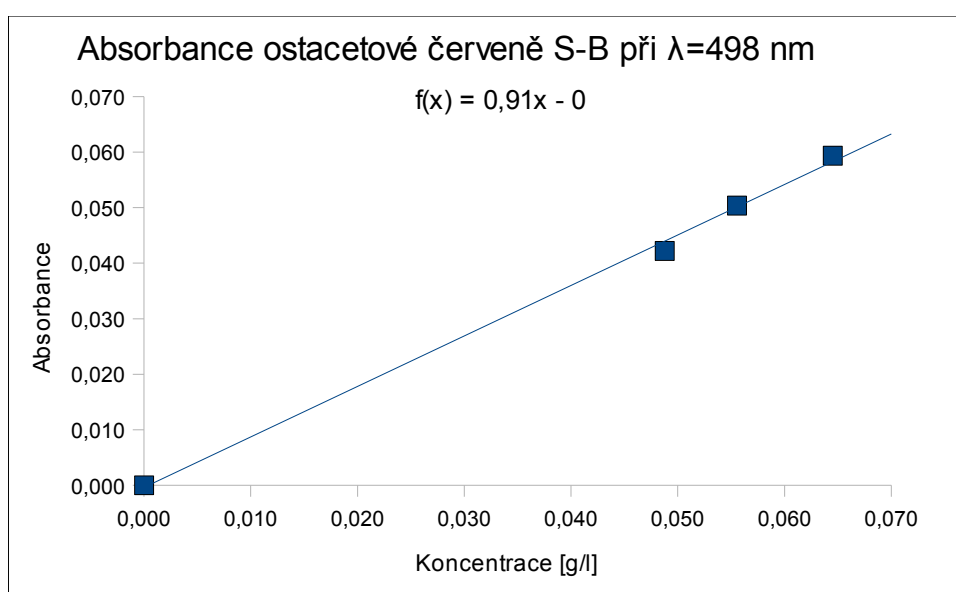
Závislost absorbance na koncentraci nazýváme kalibrační křivkou. V rozsahu Lambert - Beerova zákona má tvar přímky vycházející z počátku. Z kalibrační křivky můžeme určit koncentraci látky ve zkoumaném roztoku. [24]

Kalibrace a měření je nejpřesnější v absorpčním maximu, které zároveň umožňuje měřit i velmi nízké koncentrace a chyby způsobené příp. nepřesným nastavením vlnové délky jsou minimální neboť absorpční spektrum běžných barviv bývá v této oblasti ploché.



## Hodnocení vybarvení pomocí spektrofotometru

Nabarvená optická vlákna o délce dva centimetry a hmotnosti 0,012g byla rozpuštěna v 5ml DMF při teplotě 80°C. Po zchlazení byl roztok změřen na spektrofotometru. Pro výpočet koncentrace barviva na vlákně bylo nutné sestavit kalibrační křivky, které vznikly z naměřených hodnot roztoků o přesné známé koncentraci. Měření bylo prováděné při vlnové délce absorpčního maxima barviva  $\lambda_{\max}$ .



Graf 2: Kalibrační přímka

Tabulka č.2 Koncentrace barviva Ostac. červeně S-B na vlákně

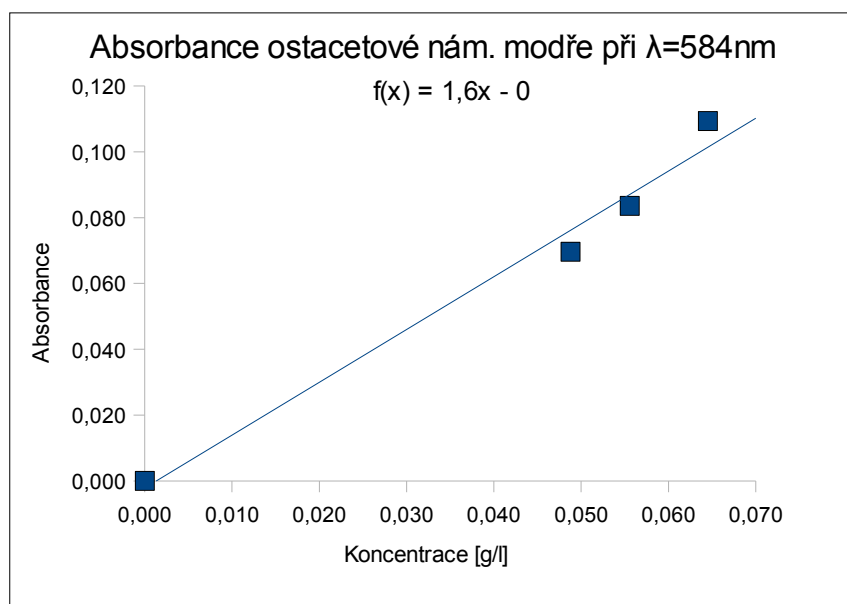
Optické vlákno barveno:	Absorbance	X [g/l]*	C [g/kg]**
15min	0,027659	0,030395	12,664530
30min	0,049123	0,053982	22,492369
45min	0,051443	0,056530	23,554335
60min	0,061788	0,067899	28,291209

\* X je koncentrace barviva v DMF s rozpuštěným nabarveným optickým vláknem:

$$X = \frac{A}{\varepsilon} \quad [\text{g/l}] \quad \varepsilon = 0,91 \quad (22)$$

\*\* C je koncentrace barviva na vlákně [g/kg] vypočítaná následujícím způsobem:

$$c = \frac{1000}{Y} * X \quad [\text{g/kg}] \quad Y = \frac{\text{hmotnost rozpuštěného vlákna} [\text{g}]}{\text{objem DMF} [\text{l}]} \quad (23)$$



Graf 3: Kalibrační přímka

Tabulka č.3 Koncentrace barviva ostac. nám. modř S-G na vlákne

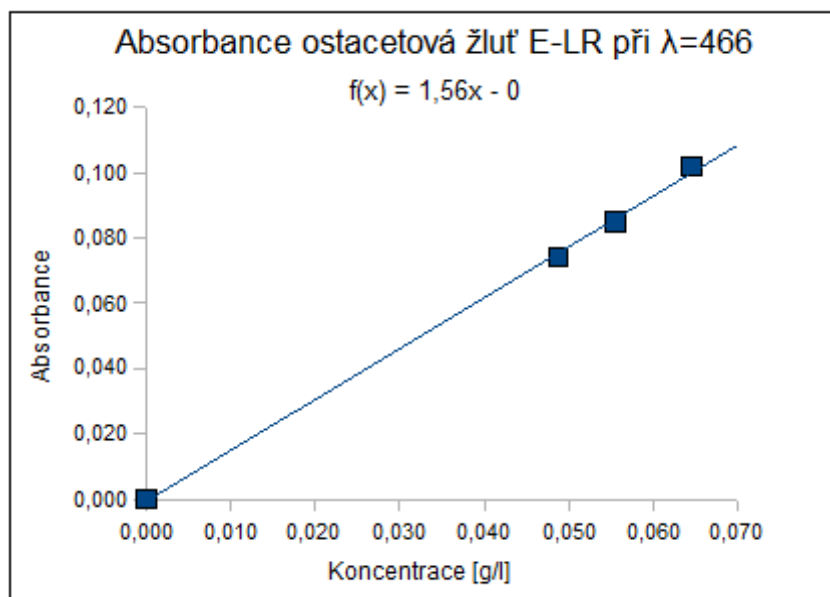
Optické vlákno barveno:	Absorbance	X [g/l]*	C [g/kg]**
15min	0,019429	0,012143	5,059722
30min	0,028790	0,017999	7,499653
45min	0,043833	0,027396	11,414931
60min	0,048787	0,030492	12,705035

\* X je koncentrace barviva v DMF s rozpuštěným nabarveným optickým vláknem:

$$X = \frac{A}{\varepsilon} \quad [\text{g/l}] \quad \varepsilon = 1,6$$

\*\* C je koncentrace barviva na vlákne [g/kg] vypočítaná následujícím způsobem:

$$c = \frac{1000}{Y} * X \quad [\text{g/kg}] \quad Y = \frac{\text{hmotnost rozpuštěného vlákna} [\text{g}]}{\text{objem DMF} [\text{l}]}$$



Graf 4: Kalibrační přímka

Tabulka č.4 Koncentrace barviva ostac. žlut' E-LR na vlákne

Optické vlákno barveno:	Absorbance	X [g/l]*	C [g/kg]**
15min	0,0367	0,0235	9,7894
30min	0,0401	0,0257	10,7187
45min	0,0426	0,0273	11,3654
60min	0,0855	0,0548	22,8300

\* X je koncentrace barviva v DMF s rozpuštěným nabarveným optickým vláknem:

$$X = \frac{A}{\epsilon} \quad [\text{g/l}] \quad \epsilon = 1,56$$

\*\* C je koncentrace barviva na vlákne [g/kg] vypočítaná následujícím způsobem:

$$c = \frac{1000}{Y} * X \quad [\text{g/kg}] \quad Y = \frac{\text{hmotnost rozpuštěného vlákna} [\text{g}]}{\text{objem DMF} [\text{l}]}$$

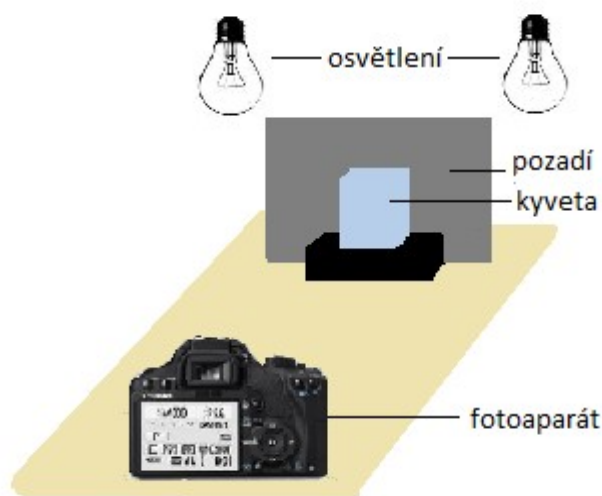
### 2.3.1.2 Hodnocení vybarvení pomocí programu ImageJ

ImageJ je nástroj pro úpravu bitmapové grafiky. Program umožňuje upravovat 6-bitové, 16-bitové i 32-bitové obrázky. Jsou zde k dispozici veškeré standardní nástroje pro úpravu bitmapové grafiky. Mezi zajímavé vlastnosti patří funkce pro výpočet statistiky z hodnot pixelů v uživatelsky definované oblasti nebo nástroj pro měření úhlů.

Optická vlákna, nabarvená ostacetovou červení S-B a nám. modří S-G (po dobu 15min, 30min, 45min a 60min), byla vyfocena v kyvetě (o šířce 0,2 cm), která byla naplněna tetrafluorethylenem (má přibližně stejný index lomu jako polyvinylidenfluor  $n=1,43$ ).

Ke kalibraci sloužily roztoky barviva s tetrafluorethylenem o koncentracích 0,2 g/l, 0,1g/l, 0,02g/l a 0,0g/l. Tyto roztoky byly vyfoceny v kyvetách různé tloušťky 0,2cm, 0,5cm a 1 cm.

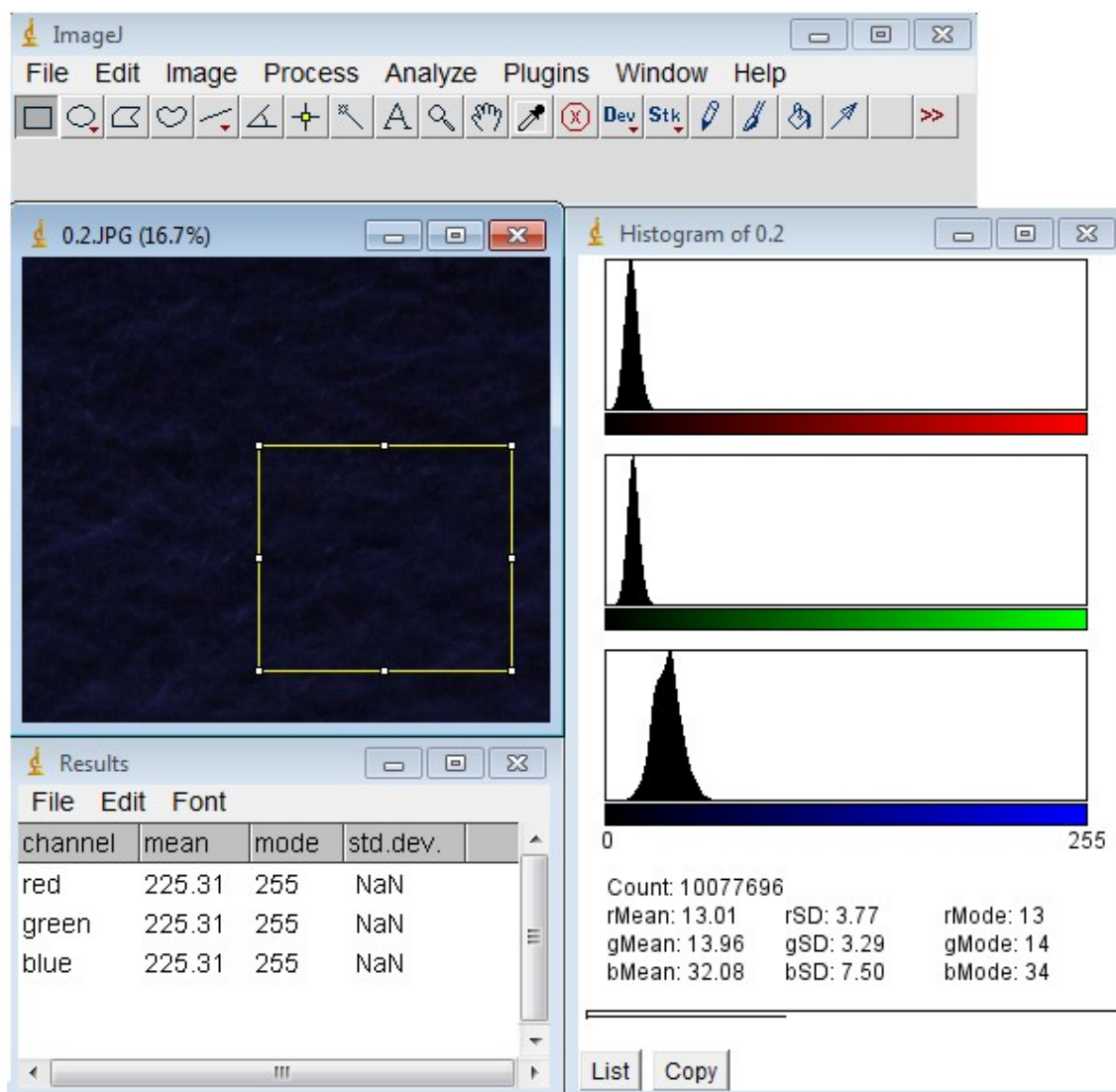
Focení probíhalo fotoaparátem Canon za konstantních podmínek. Na obrázku 31 je zobrazen způsob focení. Fotky byly zpracovány program ImageJ následujícím způsobem.



*Obr. 31 Uspořádání při focení*

## **Postup hodnocení**

Nejprve se v programu ImageJ otevřela fotografie. Označil se požadovaný úsek a byla provedena analýza, výsledkem byl barevný histogram. Z hodnot souřadnic barevného systému RGB byly sestaveny kalibrační přímky a z nich odečtena koncentrace barviva na vlákne (Obr.32).

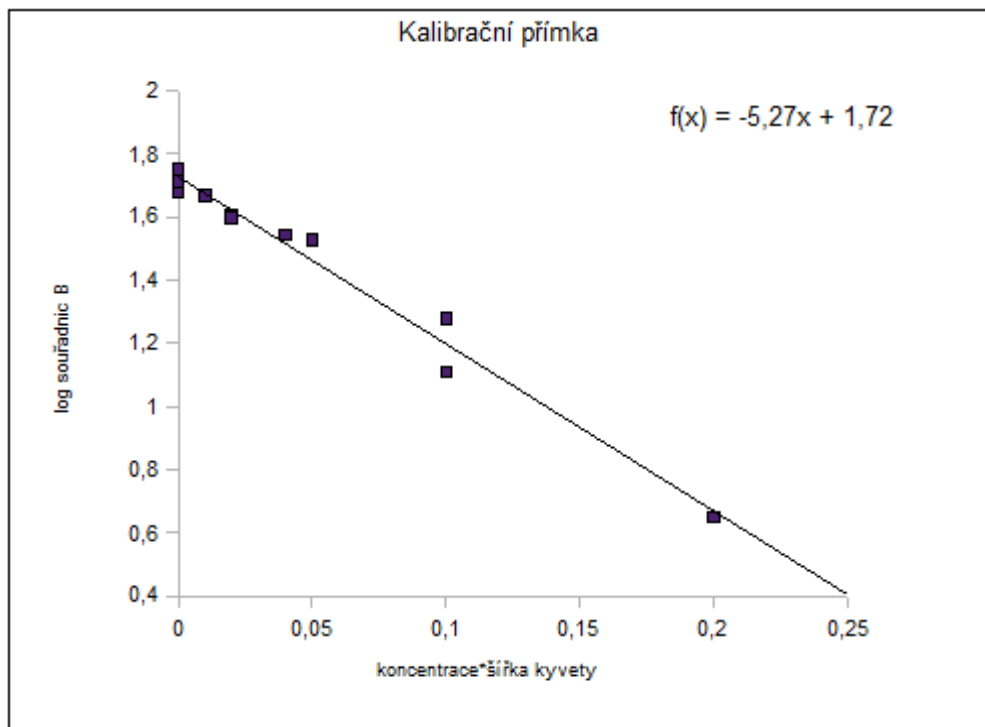


Obr. 32 Analýza roztoku barviva s tetrafluorethylenem

**Ostacetová červeně S-B***Tabulka č. 5 Hodnoty souřadnic kalibračních roztoků v barevném systému RGB*

šířka kyvety [cm]	koncentrace [g/l]	kyveta *koncentrace	souřadnice			log B
			R	G	B	
0,2	0	0	80,97	67,09	51,18	1,71
0,2	0,02	0	79,47	64,09	47,83	1,68
0,2	0,1	0,02	79,13	56,1	40,17	1,6
0,2	0,2	0,04	79,01	51,16	34,99	1,54
0,5	0	0	87,04	73,94	56,1	1,75
0,5	0,02	0,01	87,25	64,26	46,71	1,67
0,5	0,1	0,05	85,01	50,92	33,54	1,53
0,5	0,2	0,1	80,8	35,94	19,05	1,28
1	0	0	84,13	69,45	51,42	1,71
1	0,02	0,02	87,09	57,65	39,67	1,6
1	0,1	0,1	68,64	28,41	12,89	1,11
1	0,2	0,2	72,19	19,52	4,47	0,65

K vytvoření kalibrační přímky byl použit logaritmus souřadnic B. Na osu X byla nanášená koncentrace násobená šířkou kyvety.

*Graf 5 : Kalibrační přímka ostacetové červeně S-B*

Stejným způsobem byly vyhodnoceny fotografie optických vláken. Z rovnice regrese kalibrační přímky byla dopočítána koncentrace barviva na vlákne.

Tabulka č. 6 Hodnoty souřadnic barvených optických vláken v barevném systému RGB

Optická vlákna doba barvení [min]	souřadnice			log B	X [10g/m <sup>2</sup> ]	koncentrace[g/l]*
	R	G	B			
15	51,69	31,75	11,91	1,08	0,12	1,2
30	39,98	21,73	5,21	0,72	0,19	1,9
45	39,24	19,94	3,81	0,58	0,22	2,2
60	31,39	14,37	1,79	0,25	0,28	2,8

\*Koncentrace byla vypočítána následujícím způsobem:

$$c = \frac{X [10g m^{-2}]}{D [cm]} \quad (23)$$

kde c ... koncentrace barviva

X ... šířka kyvety \* koncentrace

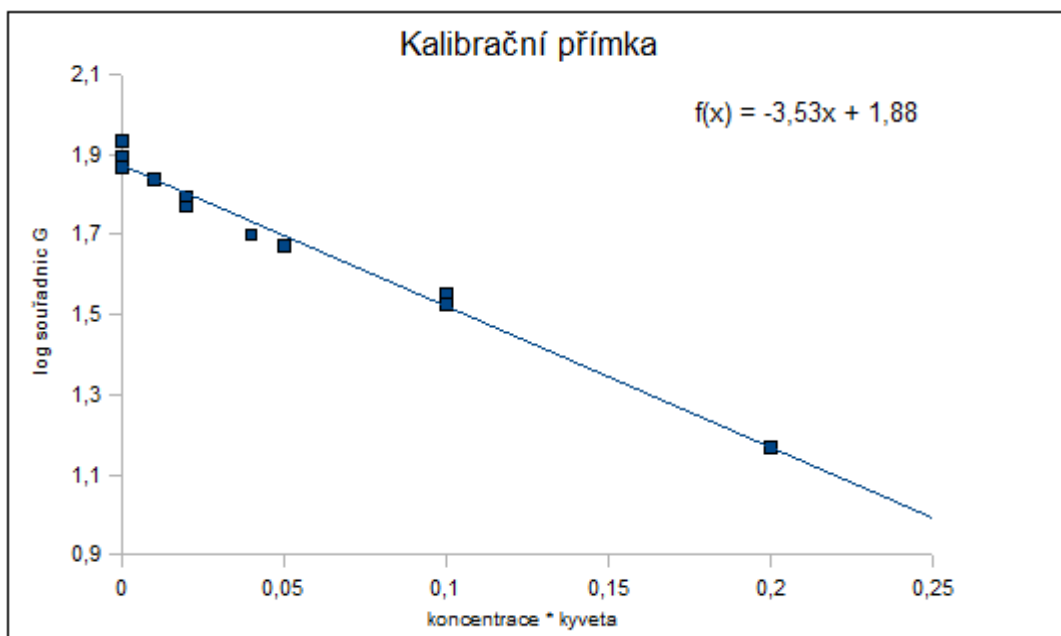
D ... průměr vlákna

### Ostacetová nám. modř S-G

Tabulka č. 7 Hodnoty souřadnic kalibračních roztoků v barevném systému RGB

Šířka kyvety[cm]	Koncentrace [g/l]	koncentrace*kyveta	souřadnice			log G
			R	G	B	
0,2	0	0	86,45	75	59,32	1,88
0,2	0,02	0	83,58	73,58	60,22	1,87
0,2	0,1	0,02	62,93	59,12	54,22	1,77
0,2	0,2	0,04	51,78	49,96	49,95	1,7
0,5	0	0	91,49	78,6	61,47	1,9
0,5	0,02	0,01	77,97	68,76	57,78	1,84
0,5	0,1	0,05	47,4	47,1	51,84	1,67
0,5	0,2	0,1	31,49	33,6	48,72	1,53
1	0	0	100,48	85,87	67,1	1,93
1	0,02	0,02	66,79	62,41	56,95	1,8
1	0,1	0,1	34,4	35,73	45,68	1,55
1	0,2	0,2	14,04	14,74	33,9	1,17

K vytvoření kalibrační přímky byl použit logaritmus souřadnic G. Na osu X byla nanášena koncentrace násobená šířkou kyvety.



Graf 6 : Kalibrační přímka barviva ostacetová nám. modř S-G

Z rovnice regrese kalibrační přímky byla dopočítána koncentrace barviva na vlákně.

Tabulka č. 8 Hodnoty souřadnic barvených optických vláken v systému RGB

Optická vlákna doba barvení [min]	souřadnice			log G	X [10g/m <sup>2</sup> ]	koncentrace[g/l]
	R	G	B			
15	35,21	32,26	46,29	1,51	0,11	1,06
30	31,78	29,4	42,58	1,47	0,12	1,18
45	28,28	26,34	41,25	1,42	0,13	1,31
60	26,52	24,71	39,49	1,39	0,14	1,39



### **2.3.2 Barvení optických vláken metodou sol-gel vrstev**

Sol-gel metoda slouží převážně pro přípravu anorganicky-oxidických materiálů a pro syntézu organicko-anorganických kompozitních materiálů, které lze jinak získat jen velmi obtížně.

Princip metody spočívá v transformaci kapalného systému (sol) na pevnou fázi (gel). Sol je koloidní roztok, tvořený pevnými částicemi (o rozměrech 1nm-1μm) suspendovanými v kapalně fázi. Částečným odpařením rozpouštědla ze solu vzniká gel. Ten je pak vysoušením převeden na xerogel, ze kterého je dalším teplotním zpracováním získán výsledný produkt (vrstvy, vlákna, jiné).

Pro nanášení se používá řada technik, jejich výběr je závislý na technologických požadavcích, tvaru a velikosti substrátu. Nejčastěji se používá metoda dip-coating nebo spin-coating.

#### **Dip-coating**

Jedná se o techniku vytahování konstantní rychlostí. Nejprve je substrát ponořen do solu, pak následuje vytažení a dokončení ( odpařování rozpouštědla z povrchu substrátu). Teplotním zpracováním dojde k přeměně gelu na xerogel a následně na amorfni nebo krystalickou vrstvu.

#### **Spin-coating**

Postup, kde substrát rotuje kolem své osy, která je kolmá na nanášecí plochu. Nejprve se nanese sol, pak následuje radikální tok solu, úlet přebytečných kapek, hydrolyza a odpařování rozpouštědla. [13]

### **Použití:**

Sol-gel metoda nachází široké uplatnění v praxi. Kromě sklářského a keramického průmyslu se materiály vyrobeny sol-gel metodou ve formě prášků, vrstev, vláken začaly používat např. v optice, v mikroelektronice.

## **Postup barvení optických vláken metodou sol-gel**

### **Příprava barvicí lázně**

Do 20 ml solu se přidalo 0,02g barviva, čímž se dosáhlo koncentrace 1 g/l. Roztok solu připravila Mgr. Veronika Zajícová na katedře chemie TUL. Princip přípravy solu spočíval v rozpuštění TMSPM ((3-(trimethoxysilyl) propylmethakrylát) v polovině potřebného množství IPA a rozpuštění ostatních složek (voda, HCl, BPO) v druhé polovině potřebného množství IPA. Poté byly oba roztoky za intenzivního míchání smíchány. Vzniklý sol byl zahříván za varu pod zpětným chladičem po dobu 30 min a po této době byl sol ochlazen. Část hotového solu byla zředěna s IPA v poměru 1:4. Sol byl označen jako AC4.

K barvení byly použity kationická barviva: Astrazon gold gelb GLE, Astrazon blau FGGL a Astrazon rot FBL.

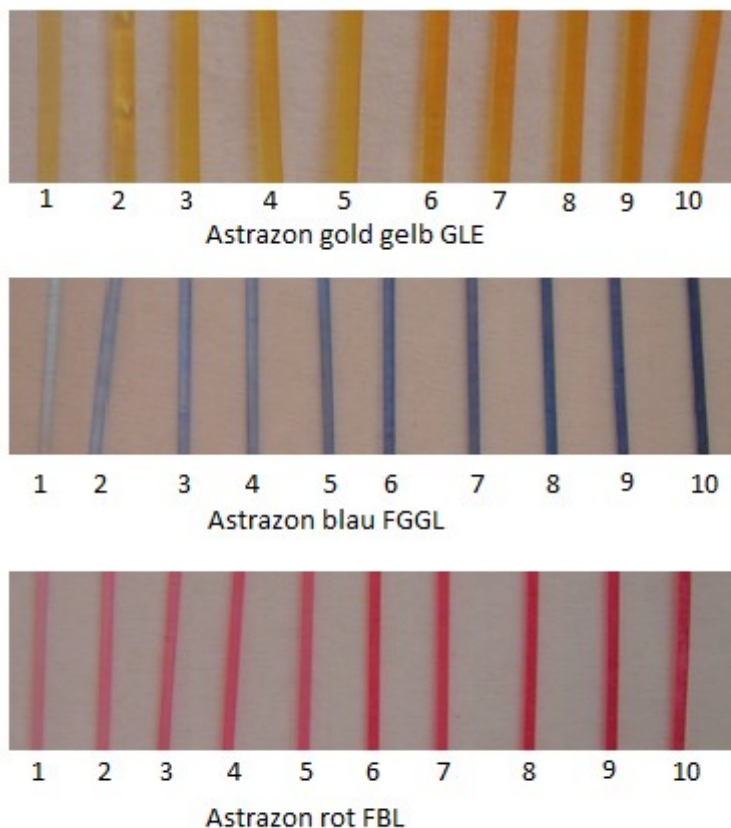
### **Příprava optického vlákna na nanášení vrstvy sol-gelu**

Optická vlákna použita k barvení metodou sol-gel byla očištěna ponořením v dichlormethanu po dobu 10minut. Následně byla vyjmuta a opláchnuta pod tekoucím dichlormethanem. Na filtračním papíře se nechala volně oschnout.

### **Nanášení barevných vrstev sol-gelu**

Barevná vrstva solu byla na optické vlákno nanášena metodou dip-coating. Vláknem se nejprve smočilo v roztoku solu, poté se vytáhlo přibližně konstantní rychlostí

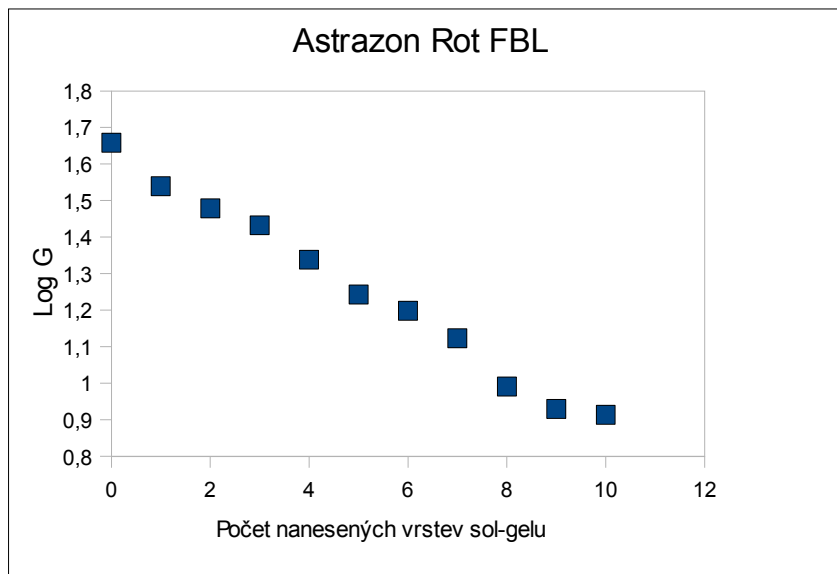
a nakonec se vložilo na 1 hodinu do sušárny při teplotě 90°C. Tento postup se opakoval než se dosáhlo 10 nanesených vrstev. Na obrázku 33 jsou znázorněny optická vlákna s jednou až deseti vrstvami barevného sol-gelu.



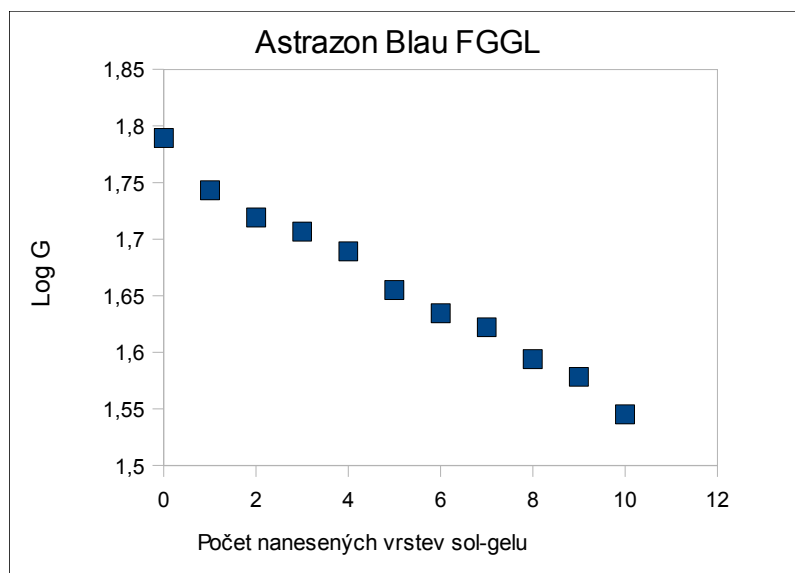
*Obr. 33 Barevné vrstvy nanášené metodou sol gel na optická vlákna*

### **Hodnocení**

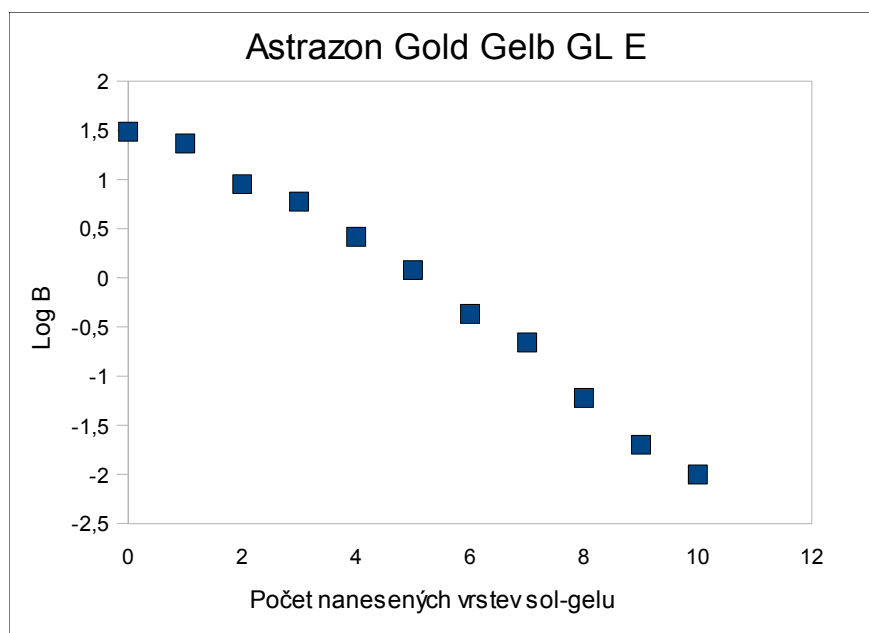
Optická vlákna nabarvená metodou sol -gel vrstev byla vyfocena v kyvetě (o šířce 0,2 cm), která byla naplněna tetrafluorethylenem. Fotky byly zpracovány programem ImageJ (viz kapitola 2.3.1.2). Z hodnot souřadnic barevného systému RGB bylo zjištěno, že koncentrace barviva přímo úměrně roste s počtem nanesených vrstev, jak dokazují graf 7, 8, a 9. Z každou následující vrstvou sol-gelu dochází k tmavnutí odstínu.



Graf 7: Graf znázorňuje závislost logaritmu souřadnic  $G$  na počtu nanesených vrstev sol-gelu.



Graf 8: Graf znázorňuje závislost logaritmu souřadnic  $G$  na počtu nanesených vrstev sol-gelu.



Graf 9: Graf znázorňuje závislost logaritmu souřadnic  $G$  na počtu nanesených vrstev sol-gelu.

Graf 7, 8 a 9 znázorňuje závislost logaritmů souřadnic barevného systému RGB na počtu nanesených vrstev sol-gelu. Se zvyšujícím počtem sol-gel vrstev se zvyšuje koncentrace barviva na optickém vlákne, to se projevuje poklesem hodnot logaritmů barevných složek systému RGB.

Tabulka č. 9 Hodnoty logaritmů souřadnic barevného systému RGB

počet vrstev sol-gelu	Astrazon Rot FBL logG	Astrazon Blau FGGL logG	Astrazon Gold Gelb GL E logB
1	1,54	1,74	1,37
2	1,48	1,72	0,95
3	1,43	1,71	0,78
4	1,34	1,69	0,42
5	1,24	1,66	0,08
6	1,2	1,63	-0,37
7	1,12	1,62	-0,66
8	0,99	1,59	-1,22
9	0,93	1,58	-1,7
10	0,91	1,55	-2

### 2.3.3 Distribuce barviva v optickém vlákně

#### Obrazová analýza Lucia

Jedná se o programový systém pro pořizování a ukládání obrazů, měření geometrických vlastností vláken, přízí a plošných textilií nebo jiných materiálů. Princip metody spočívá v analýze barevného obrazu na základě matematické morfologie. Analyzovaný objekt je pojat jako množina bodů. Lucia rozeznává dva typy základních obrazů: binární a barevný (skládají se ze tří složek RGB). Pomocí kamery je nasnímán obraz, který lze dále upravovat (např. změnu kontrastu nebo označit část obrazu a změřit požadovanou vlastnost např. plochu řezu).[3]

#### Příprava řezu optického vlákna

Řez optického vlákna byl vytvořen pomocí ručního mikrotomu. Optické vlákno se vložilo do otvoru v mikrotomu a poté se zalilo disperzním lepidlem. Po zaschnutí se vlákno vysouvalo otáčením mikrošroubu o 20  $\mu\text{m}$  a řezalo.



*Obr. 34 Příčný řez optického vlákna*

#### Výsledek

Pomocí obrazové analýzy Lucia se sledovala distribuce barviva v optickém vlákně. V obou dvou případech, jak u barvení metodou sol-gel vrstev, tak u barvení disperzními barvivy, se barvivo nacházelo pouze na povrchu vlákna.

## 2.4 Návrh konstrukce neviditelnostní textilie - OSLO

### Optický software OSLO

K navrhování neviditelnostní textilie byl použit optický software OSLO premium. OSLO je program určený pro návrh a analýzu optických soustav. Jeho možnosti jsou široké např. design běžných čoček, zoom funkce, modelování Gaussova svazku (laser), vláknotvorná optika, osvětlovací systémy, systémy s dělením paprsku atd.

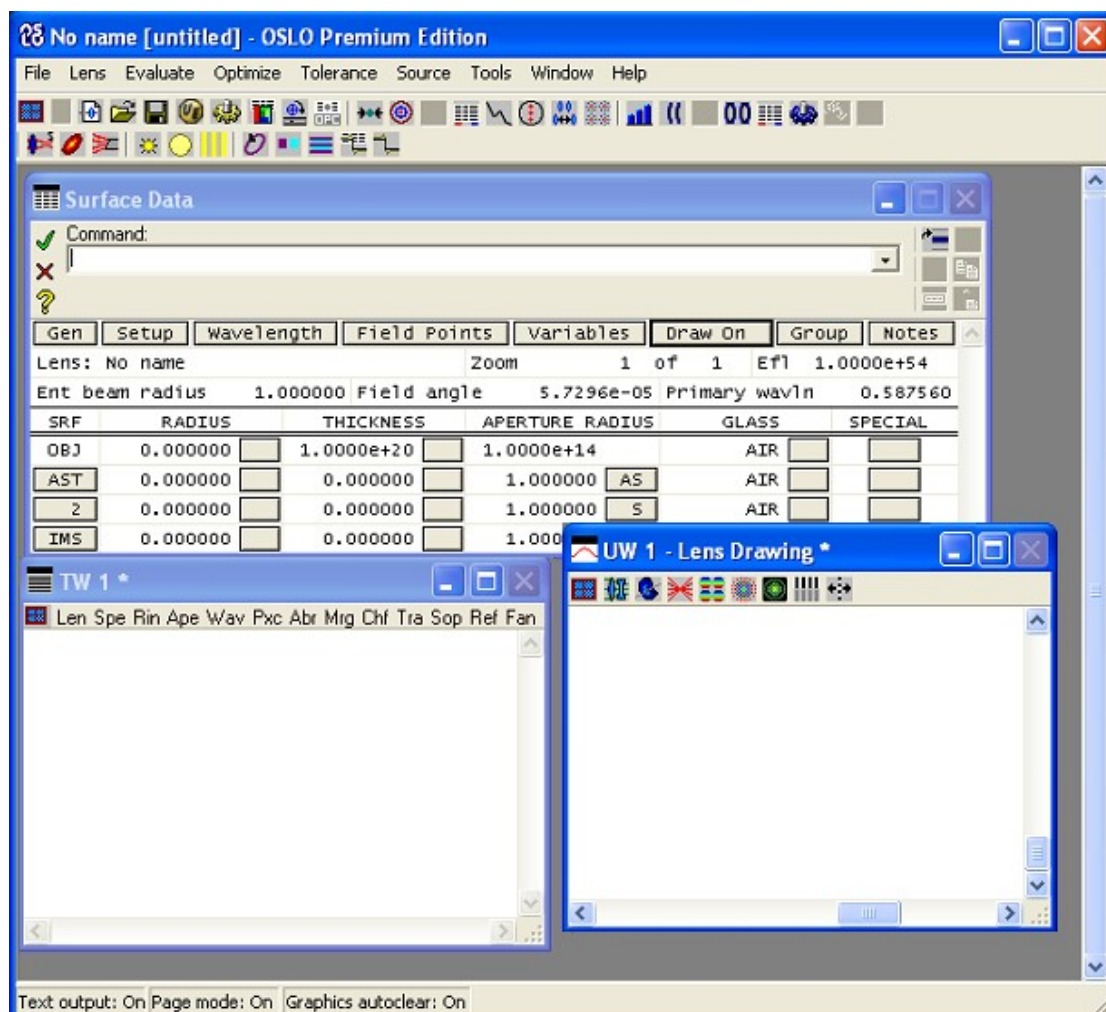
#### Použití programu OSLO :

- simulace vlastností optických systémů
- návrh nových optických soustav
- stanovení velikosti a tvarů použitých optických elementů v různých oblastech (vesmírné, vojenské aplikace)[26]

#### 2.4.1 Základy práce v optickém programu OSLO

Po spuštění optického programu OSLO se otevřou tři základní okna (Obr. 35): Command window (příkazové okno), TW1 (obsahuje textové informace během návrhu) a UW1 (zobrazuje vlastnosti navrhované soustavy).

Při návrhu nového systému se nejprve zvolí pole *File – New Lens*. Otevře se okno File new, kde je třeba zadat počet potřebných ploch a potvrdit. Následně se zobrazí okno s definicemi ploch – *Surface Data*, do něhož se zadávají informace týkající se návrhu, jestliže se okno neotevře, stačí kliknout na symbol modré čočky v levém horním rohu programu.



Obr. 35 Základní okna optického programu OSLO

## Okno Surface Data (Obr.36)

### 1. Příkazové okno (Command window)

na levé straně má tři ikony:

- zelené odtržítko – slouží k potvrzení zadaného příkazu
- červené X – slouží ke stornování provedených změn
- žlutý otazník – vyvolává nápovědu

### 2. Optické parametry systému potřebné k modelování soustavy

- Lens - uvádí název soustavy
- Ent beam radius - zobrazuje poloměr vstupujícího svazku



- Field angle – definuje velikost zorného pole
- Efl – efektivní ohnisková vzdálenostech
- Primary wavln – hlavní vlnová délka

### **3. Data soustavy**

Jednotlivé řádky popisují tvar a orientaci povrchů systémů, které způsobují odraz, lom a ohyb. Význam jednotlivých sloupců:

#### ***SRF***

SRF je číslo plochy, OBJ předmětová rovina, IMS obrazová rovina.

#### ***Radius***

Radius je poloměr křivosti plochy, kliknutím na šedé políčko vedle hodnot se zobrazí různé volby např. Solve (obsahuje další možnosti nastavení), Curvatore PickUp a Minus Curvatore PickUp (nastavení poloměru křivosti stejných jako některé z předchozích povrchů), Variable (označení daného parametru jako proměnná).

#### ***Thickness***

Thickness je tloušťka vpravo od dané plochy.

#### ***Aperture radius***

Aperture radius je poloměr plochy, kliknutím na šedé políčko vedle se zobrazí volby např. pickup P (znamená že, hodnota je převzatá z nějakého povrchu), Checked K (kontrola velikosti apertury), solved (hodnota je automaticky dopočítána).

#### ***Glass***

Glass charakterizuje použitý materiál. Program Oslo obsahuje katalog definovaných optických skel.

### Special

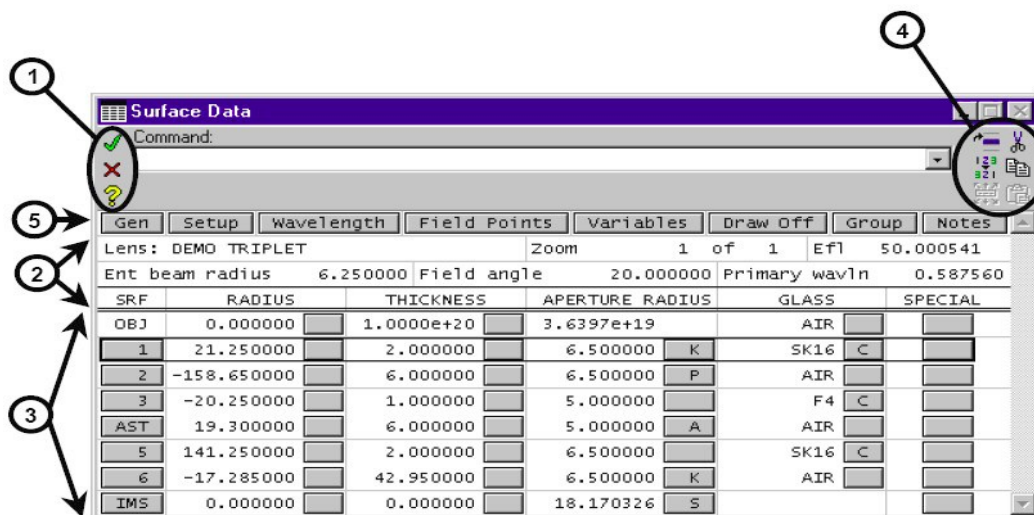
V poli jsou uváděny speciální data o ploše. Např. natáčení změna středu soustavy, nastavení parametrů povrchu, nastavení asferického povrchu.

### 4. Nástrojové ikony

Pomocí nich lze vyjmout, kopírovat, vkládat data do buněk nebo vkládat prázdné řádky.

### 5. Záložky

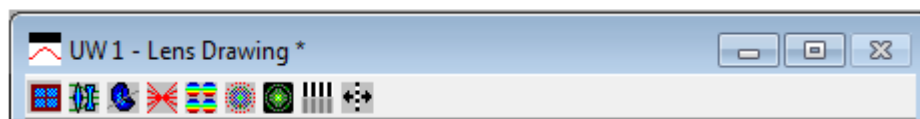
Jejich přepínáním lze otvírat další okna a nastavovat požadované vlastnosti. Kliknutím na políčko Draw on/Draw Of se zobrazí okno Autodraw, které ukazuje prováděné změny během návrhu soustavy.



Obr. 36 Popis okna surface data

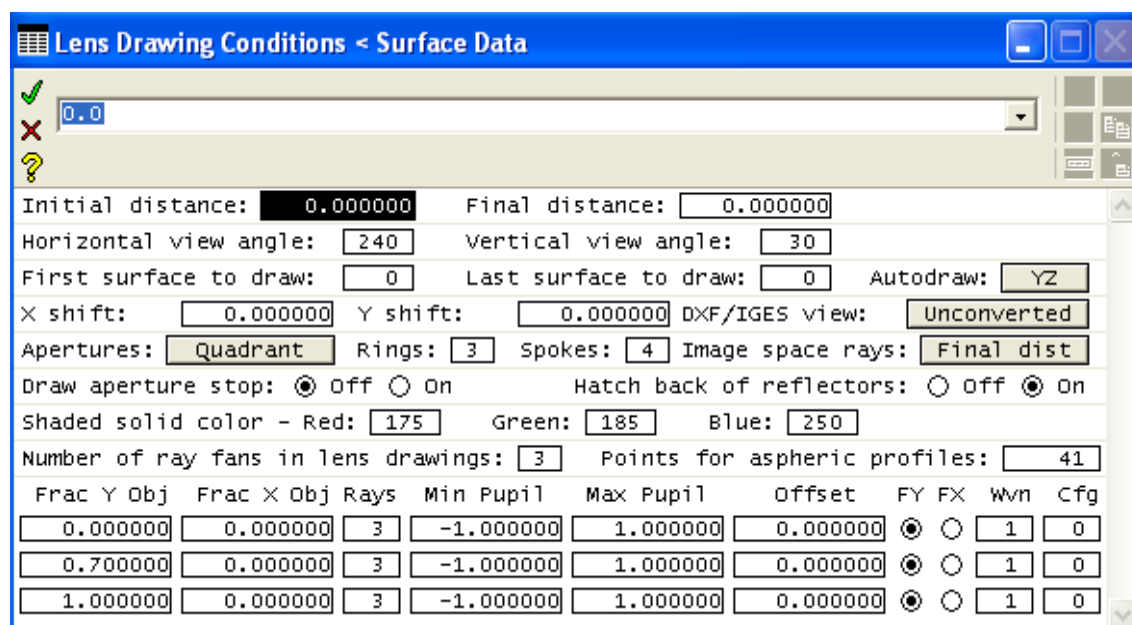
### Okno UW1

Okno UW1 zobrazuje vlastnosti navrhované soustavy. V horní části nalezneme několik ikon. Každá z těchto ikon zobrazuje jiná data pro analýzu systému. Zobrazené ikony lze měnit, k tomu je určena první ikona, po jejím otevření se ukáže podmenu s předem definovanými ikonami. Většinou bývá označena volba standard Tools (Obr.37).



Obr. 37 Základními ikony pro analýzu optické soustavy

Druhá ikona zobrazuje navrhované systémy. Lze zvolit vykreslení s paprsky nebo bez paprsků. Dále umožňuje nastavení různých parametrů pro kreslení (Obr. 38).



Obr. 38 Parametry pro kreslení

Třetí ikona umožňuje zobrazení v 3D pohledu. Pomocí čtvrté ikony se provádí grafická analýza dané soustavy. Jedná se především o grafické popsání sklenutí obrazového pole, astigmatismu (optická chyba jejichž vlivem mimoosové světelné paprsky nevytvářejí bodové ohnisko), sférickou aberaci (odchylku) a barevnou vadu posuvu.

Pátá ikona znázorňuje deformaci vlnoplochy během průchodu optickou soustavou. Šestá ikona umožňuje sestavení stop diagramu. Stop diagram je přehledem informací o stavu odchylek v optické soustavě. Sedmá ikona vyjadřuje rozložení energie. Osmá a devátá ikona popisují analýzu přenosové funkce optické soustavy.[25]

## 2.4.2 Návrh neviditelnostní textilie

Tabulka č.10 Parametry navrhovaného systému

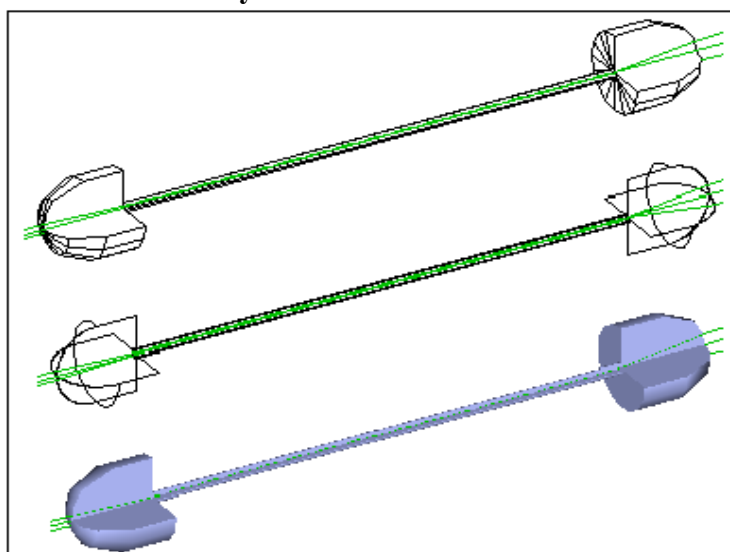
Optické čočky		Optické vlákno		Světlo	
průměr	8mm	průměr	1mm	hlavní vlnová délka	587
optická mohutnost	8mm	délka	100mm	zorné pole	30°
poloměr zakřivení	4mm	materiál	F2	svazek vstupujících paprsků	0,5
materiál	SK16	-	-	-	-
index lomu	1,62	-	-	-	-

### Zobrazení navrhované soustavy



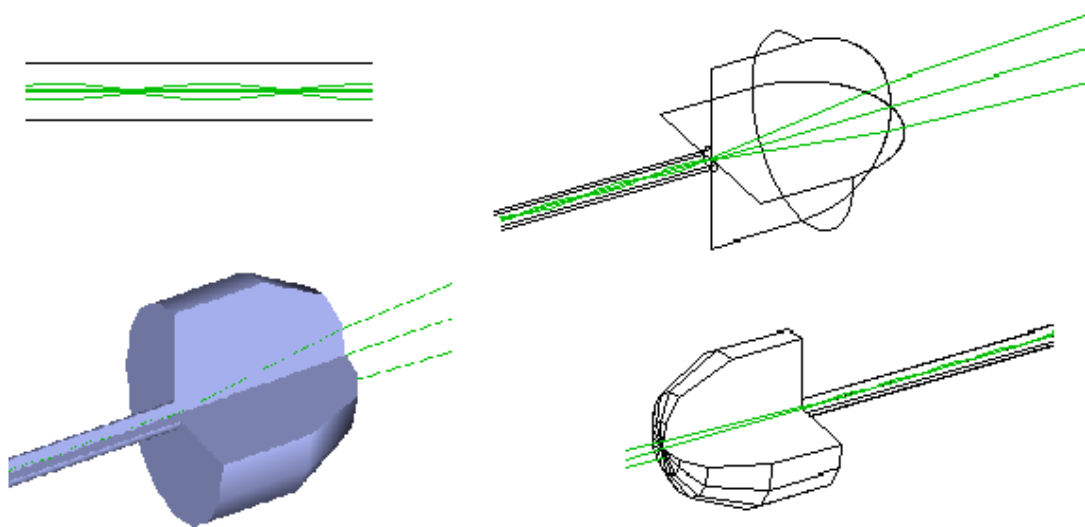
Obr. 39 Schéma navrhované soustavy

### Zobrazení navrhované soustavy 3D



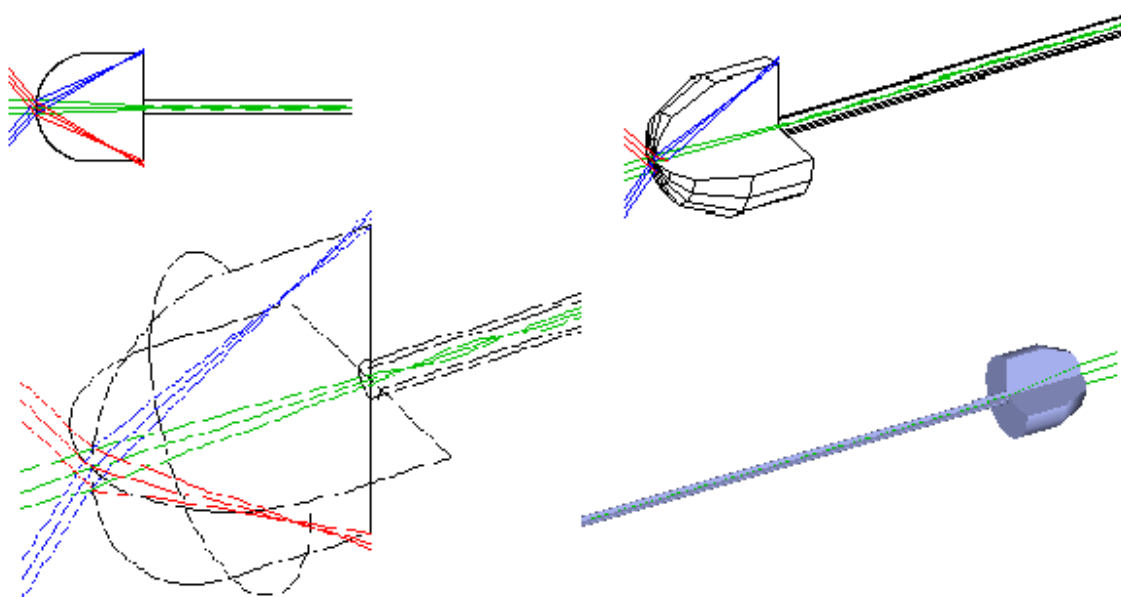
Obr. 40 Navrhovaná soustava zobrazení 3D

### Detaily zobrazení



*Obr. 41 Detaily zobrazované soustavy*

V optickém programu OSLO byla navrhována soustava skládající se ze dvou čoček a optického vlákna (viz kapitola 1.3.4). Při simulaci se zjistilo, že tento systém by nebyl odolný vůči paprskům přicházejícím téměř rovnoběžně s povrchem (Obr. 42). Systém by byl účinný při zneviditelnění předmětů pozorovaných z větších vzdáleností.



*Obr. 42 Schéma navrhované soustavy s paprsky jdoucí téměř rovnoběžně s povrchem*

## 2.5 Diskuze reálnosti neviditelnostní textilie a její použití

Diplomová práce při návrhu konstrukce neviditelnostní vycházela z principu, kdy dopadající světlo na předmět má být vedeno pomocí optických vláken na druhou stranu předmětu obrácenou k pozorovateli. Při simulaci navržené soustavy se zjistilo, že tento systém by nebyl odolný vůči paprskům přicházejícím téměř rovnoběžně s povrchem. Tento problém by mohl být vyřešen použitím speciálních čoček. Navržený systém by měl být účinný při zneviditelnění předmětů pozorovaných z větších vzdáleností.

Oblast pro aplikaci neviditelnosti je široká. Největší zájem o ni jeví ozbrojené složky. V armádě by našla uplatnění ve skrývání techniky, vozidel, letadel, lodí, vojáků, dále pak k průzkumu a ke špionáži.

Neviditelnost by našla uplatnění i v lékařství např. při operaci by se zneviditelnila ruka chirurga, byl by vidět pouze skalpel a operace by se stala přehlednější. Tím by se dopomohlo ke zvýšení úspěšnosti prováděných zákroků.

Zájem o ni by také určité projevila policie a jiné bezpečnostních složky (např. při zneviditelnění radarů, zatýkání zločinců...).

Další aplikaci neviditelnosti lze očekávat také v bankovníctví, ke skrytí zvukových bariér a jiných prvků, které negativně ovlivňujících panorama krajiny. Samostatnou otázkou je pak bezpečnost neviditelných předmětů. Neviditelná zeď může být velkým nebezpečím například pro ptáky.

Neviditelnost by se mohla stát součástí každodenního života např. při parkování aut se zprůhlední zadní část a řidič lépe uvidí, co je za autem nebo piloti v kokpitu uvidí při přistávání dráhu atd.

Neviditelnost přináší však i řadu nevýhod a to zejména nemožnost spoléhat se na vlastní smysly, nebo její zneužití při nezákonných činnostech.

## ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce se zabývala analýzou dostupného optického vlákna a jeho modifikací pomocí barvení. Dále pak zkoumala možnost konstrukce neviditelnostní textilie, experimentálně byla vyzkoušena výroba optických čoček z polymerů pro textilní systémy. Simulace navržené neviditelnostní textilie probíhala v optickém programu OSLO.

K identifikaci optického vlákna byla použita infračervená analýza, k potvrzení sloužila křivka DSC. Bylo zjištěno, že se jedná o polyvinylidenfluorid.

Optické vlákno bylo modifikováno barvením. Barvení probíhalo dvěma způsoby, metodou sol-gel vrstev a barvením disperzními barvivy. Kvantifikace obsahu barviva na vlákně byla prováděna spektrofotometricky a pomocí programu obrazové analýzy. Metodou sol-gel bylo nanášeno deset barevných vrstev, s počtem nanášených vrstev rostla přímo úměrně koncentrace barviva na optickém vlákně. U barvení disperzními barvivy byly použity různé časy barvení. S prodlužujícím časem barvení se zvyšoval i obsah barviva na optickém vlákně.

Pomocí obrazové analýzy Lucia se sledovala distribuce barviva v optickém vlákně. V obou dvou případech, jak u barvení metodou sol-gel vrstev, tak i u barvení disperzními barvivy, se barvivo nacházelo pouze na povrchu optického vlákna.

Hlavním cílem barvení byla snaha zjistit, zda lze optická vlákna nabarvit (resp. povrchově zmatnit) a tím zabránit jejich odlesku a popřípadě je ztotožnit s tkaninou do které by byly zatkány. Barvení metodou sol-gel by zároveň sloužilo jako mechanická ochrana optického vlákna. Dále se zjistilo, že barevnost povrchu optického vlákna neměla žádný výraznější vliv na barvu procházejícího světla.

Dále diplomová práce zkoumala možnost konstrukce neviditelnostní textilie. Dopadá-li světlo na rozhraní dvou optických prostředí z různými optickými vlastnostmi, pak dochází k jeho odrazu a lomu. Z každého bodu předmětu vycházejí všemi směry paprsky, které zachytí oko. Předmět se tedy stává viditelným.

Pokud by se světlo od předmětu neodrazilo, ale obešlo ho, pak by se stal předmět neviditelným. V diplomové práci se při návrhu konstrukce neviditelnostní

textilie vychází z principu, u kterého je dopadající světlo vedeno pomocí optických vláken na druhou stranu předmětu obrácenou k pozorovateli.

Přímé použití optických vláken je vzhledem k jejich hmotnosti nereálné, proto se přešlo na systém složený ze dvou stejných čoček a optického vlákna. Experimentálně byla vyzkoušena příprava optických čoček pro textilní systémy. Optické čočky byly vyráběny odlíváním pryskyřice dentakrylu do keramické formy a tavením polymeru.

Optické čočky vyrobené z dentakrylu nesplňovaly požadované optické vlastnosti. Hlavním problémem u čoček připravených tavením polymerního granulátu byly vzduchové bubliny. Nejlepších optických vlastností se dosáhlo u čoček vyrobených z tavné pistole. Tímto způsobem se povedlo připravit čočky o průměru 5mm, tloušťce cca 3mm a ohniskové vzdálenosti přibližně 1cm. Optické vlastnosti byly pro náš účel dostačující. Touto metodou se vyrobily i čočky trychtýřového tvaru, které umožňují snadnější upevnění na optická vlákna.

Konstrukce neviditelnosti textilie byla navrhována v prostředí optického systému OSLO. Jednalo se o systém složený ze dvou čoček a optického vlákna. Pro návrh byly použity čočky o poloměru 4 mm, optické mohutnosti 8 mm a poloměru křivosti 4mm. Materiál navrhovaných čoček měl index lomu 1,62. Optické vlákno mělo průměr 1mm a délku 10cm. Jednalo se o optické vlákno gradientní. U gradientních vláken paprsek opisuje sinusovou křivku. Index lomu se snižuje se vzdáleností od středu vlákna. Jako hlavní vlnová délka bylo použito 587 nm (odpovídá zelené barvě, lidský zrak je na ni nejcitlivější).

Při simulaci navržené soustavy se zjistilo, že tento systém by nebyl účinný vůči paprskům přicházejícím téměř rovnoběžně s povrchem. Tento problém by se mohl vyřešit použitím speciálních čoček. Navržený systém by teoreticky fungoval při zneviditelnění z větších vzdáleností.

Neviditelnost se v posledních letech přesouvá z oblasti science-fiction do reality a to především díky metamateriálům. Má však ještě řadu omezení např. účinnost v určitém spektru vlnových délek a pokud bychom skryli člověka, tak by nic neviděl. K dokonalé neviditelnosti zbývá ještě dlouhá cesta.



### Seznam použité literatury:

- [1] Doleček, J.: Moderní učebnice elektroniky-3.díl, BEN Praha 2007
- [2] Kucharski,M., Dubský, P.: Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras, Mikrokom Praha 1998
- [3] Militký,J., Maršálková, M.: Vlastnosti vláken, TU Liberec 2003
- [4] Tarábek, P., Červinková, P. a kolektiv: Odmaturuj z fyziky, Didaktis Brno 2004
- [5] Malý, P.: Optika, Karolinum Praha 2008
- [6] Svoboda, E. a kolektiv: Přehled středoškolské fyziky, Prometheus Praha 2003
- [7] Vik, M.: Základy měření barevnosti, 1 díl, TU Liberec 2005
- [8] Lank, V., Vondra, M.: Fyzika v kostce, Fragment Praha 2007
- [9] Krpata, F.: Aplikovaná optika, ČVUT Praha 2005
- [10] Wiener, J.: Přednášky Trendy textilní chemie, Neviditelnost, cit. 3.4.2010
- [11] Klouda, P.: Moderní analytické metody, Pavel Klouda Ostrava 2003
- [12] Černá, D.: Světlovodná vlákna v oděvních materiálech, Diplomová práce TU Liberec 2010
- [13] Poláková, M.: Metody měření fotokatalytického jevu na částicích  $\text{TiO}_2$ , Diplomová práce, TU Liberec 2008
- [14] Kryšťufek, J.: Přednášky Barvení textilií, Disperzní barviva, TU Liberec 2006
- [15] Leonhardt, U.:Metamaterials: Towards invisibility in the visible, Nature Materials, 8 (7), p.537-538,2009 doi:10.1038/nmat2472
- [16] Leonhardt, U.: Optical conformal mapping, Science 312 (5781) (2006), p. 1777
- [17] Van Noorden, R.: Leap forward for invisibility cloaks, Nature, 2009 doi:10.1038/news.2009.417
- [18] Weder, R.: A rigorous analysis of high-order electromagnetic invisibility cloaks 2008 J. Phys. : Math. Theor. 41 065207 doi: 10.1088/1751-8113/41/6/065207
- [19] Ming-Ji, Ch.: An Improved Method of Designing Isotropic Multilayered Spherical Cloak for Electromagnetic Invisibility, 2010, Chinese Phys. Lett. 27 034102 doi: 10.1088/0256-307X/27/3/034102
- [20] *ScienceDaily*. Retrieved [cit. 29. 4. 2010], from <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/08/080811092450.htm>, [11. 8. 2008]

- [21] Koukal, M.: Časopis 21 století, Cesta k neviditelnosti, aneb zmizíme na přání, [cit. 9.4. 2010] <http://www.21stoleti.cz/view.php?cisloclanku=2007091924>, [19.9. 2007]
- [22] Feld, M.: Přednášky, Optická vlákna, ČVUT [cit.5.3. 2010] [http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Opticka %20vlakna.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Opticka%20vlakna.pdf),
- [23] Polyvinylidenfluorid, [cit.12.4. 2010] <http://www.kupen.cz/katalog/pvdf/>
- [24] Lambert-Beerův zákon, [cit 12.4. 2010] <http://projektalfa.ic.cz/LB.htm>
- [25] Přednášky: Základy\_OSLO , ČVUT [cit. 25. 4. 2010] [radio.feld.cvut.cz](http://radio.feld.cvut.cz)
- [26] Optical sotwar OSLO [cit. 20.4. 2010] [http://www.lambdares.com/education/oslo\\_edu](http://www.lambdares.com/education/oslo_edu)
- [27] New Scientist: Spiders weave a web of light, [26. 4. 2010] <http://www.newscientist.com> [22.3. 2010]
- [28] Harris, William, and Robert Lamb. "How Invisibility Cloaks Work. [29.4. 2010] <http://science.howstuffworks.com/invisibility-cloak.htm>>[20.6. 2005]
- [29] Militký, J.: Inteligentní textilie [cit.9.3. 2010] [http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/inteligentni\\_textilie.pdf](http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/inteligentni_textilie.pdf)
- [30] Magazín o módě Salon: Oblečení na baterky, [cit. 3.4 2010] <http://www.salon.cz/modni-zajimavosti/soucasnost/obleceni-na-baterky/articles.html?Id=212>, [31. 3. 2007]
- [31] News and events: Team Introduces World's First Invisibility Cloak, [cit.29.4.2010] [http://www.eng.umd.edu/news/news\\_story.php?id=2550](http://www.eng.umd.edu/news/news_story.php?id=2550), [13. 12 2007]